

REGIONE TOSCANA
Consiglio Regionale

PIANETA GALILEO 2006

A cura di Alberto Peruzzi

Consiglio Regionale della Toscana
Area di Coordinamento per la Comunicazione e la Rappresentanza

Grafica e impaginazione: Patrizio Suppa, Settore Comunicazione
istituzionale, editoria e promozione dell'immagine
Composizione e stampa: Centro stampa

Finito di stampare nel mese di giugno 2007
presso il Centro Stampa del Consiglio Regionale della Toscana,
via Cavour, 4 - Firenze

Realizzato con il contributo della

FONDAZIONE
MONTE DEI PASCHI
DI SIENA

Indice

Presentazione *Riccardo Nencini e Gianfranco Simoncini* 5

Introduzione *Alberto Peruzzi* 7

Lezione galileiana - Critica della ragion informatica nelle scienze della natura *Giuseppe Longo* 11

PROSPEZIONI

Anche Galileo può errare *Andrea Frova* 35

Il principio di similitudine in fisica *Roberto Casalbuoni* 49

Meteoriti: natura e provenienza *Curzio Cipriani* 67

La biochimica del 2000 *Gianni Cappugi* 79

Dinamica cognitiva: complessità e creatività. Un elogio dell'oblio *F. Tito Arecchi* 89

La psicologia del sonno *Piero Salzarulo* 109

La coscienza: tra filosofia e neuroscienze *Giacomo Romano* 115

La robotica umanoide *Remo Ricchetti, Carlo Alberto Avizzano, Massimo Bergamasco* 131

Ontologia e teoria dei sistemi: un contributo all'ingegneria del software *Carlo Scognamiglio* 145

Fantascienza e filosofia della mente *Marco Salucci* 159

Questioni di bioetica, scienza e antropologia filosofica *Stefano Miniati* 179

SCIENZA E STORIA

Il neolitico e l'età dei metalli in Toscana: sviluppi culturali e strategie insediative *Renata Grifoni Cremonesi* 199

I gruppi di cacciatori raccoglitori e la preistoria olocenica nella piana fiorentina *Fabio Martini, Lucia Sarti* 213

Storia di pi greco *Alessandra Del Piccolo* 223

Galileo e Liceti, ovvero genio e mediocrità *Mariapiera Marenzana* 239

L'attività dell'Accademia dei Fisiocritici *Sara Ferri* 255

Alexandre Koyré e la nascita della scienza moderna *Graziella Federici Vescovini* 261

Poincaré matematico e filosofo *Gaspare Polizzi* 269

DIDATTICA E COMUNICAZIONE SCIENTIFICA

Insegnare geometria *Vinicio Villani* 289

L'innovazione dell'insegnamento scientifico nella scuola secondaria superiore: il caso della chimica *Carlo Fiorentini* 303

L'insegnamento della biologia *Brunella Danesi* 321

***e*-lab: nuovi strumenti informatici per l'insegnamento delle scienze biologiche** *Neri Niccolai, Andrea Bernini, Stefano Chiellini* 333

Archimede in città *Alberto Alberti* 345

***La matematica in cucina*: dal libro allo spettacolo** *Angelo Savelli* 351

Film fantastici e mondi possibili *Andrea Sani* 355

La scienza, come raccontarla? *Anna Parisi* 371

Dal web all'i-Pod *Caterina Boccato* 375

Divulgare la scienza: leggere e saper fare *Helene Stavro* 383

SCIENZA E SOCIETÀ

Risorse energetiche *Renato A. Ricci* 395

La bomba e la proliferazione nucleare, *Roberto Fieschi, Francesco Lenci* 427

Il Fisico scettico:dialogo sul fosforo bianco *Nicola Cufaro Petroni* 449

Chimica e ambiente *Riccardo Basosi* 467

I disturbi del comportamento alimentare: un'epidemia moderna *Laura Dalla Ragione* 485

Rilevazioni, mappe geolinguistiche e prospettive di ricerca in aree multilingui *Carla Bagna* 501

La progettazione eco-sostenibile di un nuovo quartiere: il progetto europeo Ecocity *Massimo Bastiani* 511

La progettazione di un complesso residenziale ad alto risparmio energetico: il centro residenziale Sesto Ricasoli *Marco Margheri* 521

Presentazione

Guardarsi attorno, seguire i confronti sempre più aspri che scaturiscono dai grandi temi di attualità, lo sviluppo sostenibile, l'ambiente, i progressi nel campo della difesa della salute, il tumultuoso arricchimento di sempre nuove tecnologie, la scoperta di nuovi strumenti 'per' e 'contro' l'uomo, i rinnovati conflitti fra scienza e fede, fra scienza e etica.

È questo un panorama che fa diventare grandi, sempre più pressanti, le responsabilità e le speranze degli scienziati nei confronti della società tutta, come in una catarsi continua della quale si stenta a trovare una interpretazione condivisa.

La scienza e gli scienziati hanno bisogno di un contatto permanente, rinnovato e diverso con i cittadini, che vada al di là delle occasioni, dei programmi e dei luoghi 'istituzionali'.

Se Pianeta Galileo si è posto un obbiettivo strategico prioritario, di sicuro è quello di coniugare educazione scientifica e formazione della persona attraverso percorsi che trasformino in vero e proprio 'piacere' l'impegno che normalmente comporta l'avvicinarsi ad argomenti spesso ostici e lontani dall'esperienza quotidiana.

Di qui un programma ricco di incontri, lezioni, laboratori, mostre, visite guidate, con scienziati e educatori impegnati nell'uso di linguaggi appropriati, in spiegazioni e dimostrazioni che facciano divertire ed emozionare.

Rendere sempre più attuale questo obbiettivo, che tanti successi ha registrato nelle edizioni precedenti di Pianeta Galileo, ci sembra il miglior modo di formare un cittadino responsabile, disponibile al colloquio e alla comprensione reciproca, perché solo la penetrazione della conoscenza può influire positivamente su realtà consolidate e riottose al cambiamento.

Riccardo Nencini
Presidente del Consiglio Regionale della Toscana

Gianfranco Simoncini
Assessore all'Istruzione, alla Formazione e al Lavoro della Regione Toscana

Introduzione

Alberto Peruzzi

Università di Firenze

Ci sono alcune semplici considerazioni che possono servire come apertura: il futuro di una democrazia dipende dalla cultura dei suoi cittadini; la formazione di questa cultura non può trascurare l'apporto della conoscenza scientifica; la diffusione della scienza richiede la diffusione di una 'mentalità' scientifica.

Come avvicinare i giovani a questa 'mentalità'? Come migliorare l'educazione scientifica valorizzando le iniziative legate all'autonomia scolastica? Come irrobustire la didattica (ma anche la stessa ricerca) in ambito scientifico mediante una più attenta consapevolezza storica ed epistemologica? Ma anche: come favorire un più efficace rapporto tra ricerca universitaria e trasferimento delle conoscenze sul piano tecnologico? E in una prospettiva ancora più ampia: come impostare un dialogo tra cultura scientifica e cultura umanistica che risulti fecondo per entrambe? Per tradursi proficuamente in ricchezza economica, la conoscenza ha bisogno di essere riconosciuta come ricchezza; e la mentalità da cui trae nutrimento ha bisogno di essere riconosciuta nei suoi valori fondanti. Si può fare qualcosa per promuovere questo duplice riconoscimento?

Sono, questi, alcuni degli interrogativi ai quali Pianeta Galileo si propone di dare una risposta. È una risposta concreta, operativa, non demandata alle calende greche ed è, certo, una risposta parziale e *per esempi*, piuttosto che sistematica e istituzionale; ma è pur sempre una risposta che si sforza di integrare in un quadro coerente le risposte alle singole domande su elencate.

Pianeta Galileo è giunto nel 2006 al suo terzo compleanno. L'iniziativa, promossa dal Consiglio Regionale della Toscana, non è un altro festival della scienza: oltre ad averne diversa struttura, si pone anche un obiettivo diverso da quello tipico di un festival. Per certi versi, può sembrare qualcosa di più tradizionale, perché include una serie (nutrita) di lezioni a carattere introduttivo, panoramico, 'divulgativo', invece di offrire esclusivamente eventi 'partecipativi'. Tradizionale è pure l'idea secondo cui risulta difficile partecipare a qualcosa che non si è stati aiutati a capire nelle sue basi concettuali e teoriche.

In realtà, più che un obiettivo di 'divulgazione', Pianeta Galileo si pone il compito di far convergere più obiettivi educativi e formativi, in relazione al sapere scientifico, che solitamente sono perseguiti da iniziative fra loro ben distinte. E ciò appunto nell'idea che questi diversi obiettivi si possano e si debbano integrare in una cornice unitaria, perché più interrelati di quanto solitamente si è inclini a credere.

Si vuole aiutare i giovani a capire le piccole e grandi domande che stanno dietro

alle soluzioni offerte come materia d'insegnamento; si vuole favorire l'interesse per temi poco coperti dai programmi scolastici ma anche ravvivare il senso di argomenti 'manualistici' e proprio attraverso l'incontro con la ricerca attuale; si vuole offrire un'occasione per discutere di didattica agli insegnanti di scienze tenendo presente l'orizzonte storico e filosofico oltre che quello psico-pedagogico; si vuole avvicinare la più ampia cittadinanza a un'idea più 'ricca' della scienza, che non la riduca alla dimensione tecnologica ma che neppure sottovaluti questa dimensione.

All'integrazione fra tali obiettivi è essenziale che si cominci a riflettere tanto su ciò che la scienza è, di fatto e in linea di principio, quanto su ciò che scienza non è. Il che significa anche aprire la riflessione alla storia delle idee, dei metodi, delle teorie scientifiche ... e delle relative interpretazioni e applicazioni. È essenziale, dunque, un momento di analisi filosofica (e più specificamente, epistemologica) allorché si prende in esame il modo in cui l'idea stessa di scienza si è trasformata nel tempo, si rendono esplicite e si discutono le ragioni di questa trasformazione, si considerano i motivi per i quali diciamo 'oggettivo' un sapere che s'impernia su razionalità dell'argomentazione e su prove sperimentali.

Non è difficile capire che, imboccando una via simile, il rischio è ... produrre un effetto diametralmente opposto a quello desiderato. L'effetto si chiama distanza e noia, scolasticismo e metodologismo. Per evitare questo rischio, Pianeta Galileo presta particolare attenzione alle frontiere della ricerca, facendo leva sui problemi scientifici oggi in discussione e ridiscutendo il senso (e i limiti) del sapere depositatosi nei manuali e nei programmi scolastici; soprattutto, vuole creare occasioni nelle quali chi fa ricerca possa comunicare di persona, ai giovani e ai meno giovani, il significato del suo lavoro e, più in generale, lo spirito esplorativo, razionale e sperimentale, che anima la scienza, invece di sentirne parlare da pur valenti divulgatori o di averne notizia, in forma fatalmente episodica, dai media.

Attraverso questo spirito (mentalità, atteggiamento), si intende favorire una diversa immagine della scienza, che non la riduca a isola separata dalla cultura 'vera e propria'. Una formazione culturale che releghi la conoscenza scientifica in secondo piano può andar bene per una società in cui la scienza si riduce a tecnica, non per una società democratica i cui cittadini hanno la possibilità di giudicare con cognizione di causa di questioni che riguardano tutti e presuppongono un'opinione informata.

Si tratta, sì, di informare sulle scoperte recenti e sulle aree di ricerca che, oltre a essere promettenti, permettono di ripensare in modo nuovo anche temi consolidati dell'insegnamento scientifico, ma si tratta di farlo in un modo che aiuti a liberarsi da alcune, diffuse, immagini 'di maniera' della scienza. Da dove partire?

L'idea di Pianeta Galileo è appunto quella di mettere direttamente in contatto scuola e ricerca, invece di passare per un numero indeterminato di mediazioni di seconda e terza mano. È per questa stessa via che si vuole portare l'attenzione sui legami che il discorso scientifico ha con altre forme, e temi, della cultura contemporanea: dai rapporti fra musica e fisica alle prospettive della robotica (e ai problemi che cerca di risolvere), dalle

questioni etiche che riguardano recenti sviluppi della biologia alle nuove modalità di comunicazione che le tecnologie dell'informazione hanno reso possibili – per elencare soltanto alcuni degli argomenti trattati all'interno di Pianeta Galileo nel 2006.

In una simile cornice un posto di rilievo spetta al contatto con la ricerca in corso d'opera, fatta e raccontata in prima persona, su temi che tipicamente attraversano le cosiddette 'barriere disciplinari'. Non meno importante è – scusate se lo ripeto – il posto che spetta alla consapevolezza storica e filosofica del sapere scientifico. Da questa convinzione deriva la presenza frequente, nell'ambito di Pianeta Galileo (e non solo nel 2006), di lezioni, seminari e dibattiti che hanno avuto come oggetto l'opera di figure eminenti del passato (da Galileo a Poincaré, da Darwin ad Einstein) nelle quali si trovano, l'una accanto all'altra, ricerca e riflessione sul senso della ricerca.

Quanto appena accennato voleva illustrare alcuni motivi ispiratori di Pianeta Galileo, pur su un piano generale e in forma sintetica, ma voleva anche servire da (minima) spia per intendere il progetto da cui nasce il presente volume di atti, nel quale trovate raccolta una parte dei contributi, ben più numerosi, presentati nel corso delle manifestazioni del 2006.

Sebbene in forma parziale, questo volume, unitamente ai due precedenti (relativi alle edizioni del 2004 e del 2005), documenta il percorso di crescita che Pianeta Galileo ha compiuto dal suo inizio, grazie al sostegno istituzionale del Consiglio Regionale e anche, sotto il profilo del finanziamento, al contributo della Fondazione Monte dei Paschi di Siena. Accanto a questo sostegno, l'apporto organizzativo delle province, dei comuni, degli atenei, delle associazioni degli insegnanti e di numerose società scientifiche è stato ugualmente determinante ai fini del successo dell'iniziativa. A essi va il ringraziamento del Comitato Scientifico di Pianeta Galileo e, in particolare, il mio personale.

Per dare un'idea delle dimensioni raggiunte dall'iniziativa, basti segnalare che, tra ottobre e novembre 2006, Pianeta Galileo ha visto partecipare migliaia di ragazzi e ragazze, docenti, e 'semplici' cittadini interessati, a circa duecento eventi, distribuiti sul territorio delle dieci province della Toscana. A ritmo serrato si sono succedute lezioni-incontro nelle scuole, conferenze, proiezioni e rappresentazioni teatrali, cui si sono aggiunti seminari per insegnanti, tavole rotonde su ricerca e industria, incontri dedicati alle esperienze innovative condotte all'interno del Progetto Regionale di Educazione Scientifica, visite guidate (a musei, laboratori universitari, centri di ricerca, siti archeologici, parchi naturali).

Chi volesse saperne di più, può visitare il sito internet in cui è documentato il programma così come si è svolto nella sua interezza: http://www.consiglio.regione.toscana.it/news-ed-eventi/pianeta-galileo/default.asp. Rispetto ai due anni precedenti questo sito si è accresciuto di materiali, tutti scaricabili gratuitamente, tra i quali il testo per intero, in formato pdf, degli articoli pubblicati negli atti delle edizioni 2004 e 2005 di Pianeta Galileo. Per l'edizione 2006, è stato realizzato anche un sito satellite, ricco di interviste e documenti multimediali inediti, oltre che di link e di indicazioni

bibliografiche, suddivise per area tematica: http://www.pianetagalileo.it/.

Non mi resta che augurarvi buona lettura. La gamma dei temi trattati nei numerosi contributi è molto ampia e ci sarà sicuramente – è un auspicio – qualcosa di vostro interesse. In ultimo, ai relatori che in tempi così stretti hanno fornito il testo del loro intervento va il mio più sincero ringraziamento.

Lezione Galileiana

Critica della Ragion Informatica nelle Scienze della Natura*

Giuseppe Longo**

Dépt. d'Informatique, CNRS et École Normale Supérieure, Parigi

Cercheremo in questo testo di mettere brevemente in evidenza alcuni principi costitutivi di quella particolare forma di conoscenza che ci è data dalla macchina digitale, il moderno computer, nel suo rapporto con la matematica, da cui si origina, ed alle scienze della natura (fisica e biologia). La tesi di fondo è che la ricchezza, storica e concettuale, della teoria che ha permesso la realizzazione pratica di questa straordinaria macchina è lungi dall'esser «neutra» o «trasparente» rispetto al reale. In particolare, in relazione alle strutture causali e alle rotture-di-simmetrie che le generano – strutture centrali dell'intelligibilità della Natura –, la macchina digitale ne propone di proprie. Questo permetterà di accennare a una distinzione fra «imitazione» e «modellizzazione», nell'attività di simulazione o formalizzazione e di mettere in evidenza limiti e potenzialità della simulazione digitale.

1. Dall'alfabeto alla macchine

La novità straordinaria con cui ci confrontiamo oggi è una macchina frutto di un percorso storico-evolutivo molto articolato. Questa macchina non c'era «prima», nello stesso modo in cui 300 milioni di anni fa non c'erano i mammiferi sulla faccia della terra. Nella dinamica sempre costitutiva di novità del sistema evolutivo emergono i mammiferi – nulla di miracoloso, solo una vicenda molto complessa che mescola invarianza e variabilità, continuità e cambiamento, in parte aleatori, in parte ancora non ben classificabili nelle attuali categorie fisiche di determinazione. In modo analogo, se non più complesso, si sviluppa la storia umana e, al suo interno, con una continuità/discontinuità che è ricca di pratiche comuni, del linguaggio, della cultura simbolica, si arriva a questa macchina, il calcolatore digitale, che sta cambiando il mondo. Essa è il punto attualmente massimo di un percorso tutto particolare che inizia certo con il linguaggio ma risente soprattutto della nascita e lo sviluppo dell'alfabeto: la macchina digitale è in primo luogo una macchina alfabetica, poi è logica e formale. In breve, è un'invenzione tanto straordinaria quanto contingente alla nostra cultura, marcata dalla nascita dell'alfabeto, dalla razionalità cartesiana, dalla logica di Frege, dai formalismi di Hilbert.

Poniamoci dunque il problema di considerare che impatto ha tale macchina nella costruzione di conoscenza; infatti, la macchina non è neutrale, impone a chi la usa una storia ed una logica, uno sguardo organizzatore dei fenomeni. Gli atteggiamenti più deleteri sono quelli ingenui nei confronti della novità che l'evoluzione e la storia ci danno (o che ci diamo in essa): il non saper vivere nel proprio sapere, il non saper cogliere l'originalità del proprio sapere e proiettare indietro l'ultima nostra invenzione, ricca di storia umana, come se fosse già nel mondo, o ne fosse un'immagine fedele. Ed andar dicendo: l'universo tutto è un grande calcolatore digitale oppure… ogni processo, fisico, biologico, è un calcolo. Ovvero, la teoria di Turing è «completa» e «massimale»: persino l'attività di una cellula o il quantum computing le è riducibile. È pretendere, aristotelicamente, di avere la «Teoria Definitiva».

Purtroppo, questo atteggiamento ingenuo è stato spesso assunto, nel corso della storia. Tre o quattromila anni fa, quale era la tecnologia più avanzata? ... il realizzare vasi con l'argilla. Allora l'uomo ha detto di essere stato creato da Dio con l'argilla, plasmata all'uopo, proprio come l'uomo fa i vasi (più un piccolo soffio vitale). Nel Seicento e nel Settecento la tecnologia più avanzata era costituita dagli orologi, i meccanismi con ingranaggi e pulegge … allora l'uomo ha detto che Dio aveva creato l'universo, il vivente in particolare, nello stesso modo in cui egli costruiva le macchine, i meccanismi ad orologeria. Invece, gli ingranaggi erano originalissimi, in alcun modo presenti, con ruote dentate e molle, nel mondo, tanto meno nel vivente, e bisognava coglierne l'originalità per effettuare la svolta successiva, la nascita delle macchine della grande industria, ingranaggi mossi dalla forza del vapore, che cambieranno, arricchendoli immensamente, i nostri modi di vita. E si smette allora di realizzare ballerine meccaniche, pianisti e giochini (deliziosi peraltro) che tentavano di rappresentare l'uomo, gli animali, i pianeti.

In Informatica si può osservare un processo storico analogo. Abbiamo costruito questa macchina assolutamente originale e subito si ripetono i soliti atteggiamenti ingenui: Dio ha fatto il mondo così … il cervello, il genoma, l'evoluzione sono come questa macchina, ovvero programmi, algoritmi e *digit*. La prima volta, i pupazzi di argilla, l'idea è molto poetica, la seconda un po' meno, la terza si rasenta il ridicolo. E soprattutto non si coglie l'originalità di questa straordinaria scienza e tecnologia che, organizzando a suo modo – ed immagine – il nostro sguardo sui fenomeni, ci aiuta e ci indirizza nel fare conoscenza. La macchina, come ed ancor più degli altri strumenti nel passato, segna profondamente il nostro rapporto alla scienza, come l'alfabeto o la stampa hanno trasformato e segnato le nostre società, il nostro stesso modo di costruire conoscenza. Non mi soffermerò a lungo su tutti i temi trattati (v. i riferimenti, scaricabili) ed accennerò solo allo sguardo che l'informatica ci propone, impregnato da un efficacissimo organizzare la conoscenza in caselle, in *bit*, in *pixel*, in un discreto esatto e, in alcuni casi, assoluto, senza smoothness, senza sfumature, senza *gestalt* e senza *aleas*. O meglio, con al più imitazioni importantissime, ma forzate ed estranee alla sua logica, di componenti siffatte del mondo e della conoscenza.

Vorrei quindi ritornare brevemente su come le radici di questa macchina siano antichissime: nell'alfabeto. In primo luogo, proprio come con l'alfabeto 6.000 - 5.000 anni fa, oggi, con la *discretizzazione* informatica della conoscenza, abbiamo fatto un'altra invenzione di enorme rilievo. Pensate all'originalità di questi primi gruppi in Mesopotamia, i gruppi altamici, che frantumarono il flusso linguistico, un canto parlato continuo, annotando alcuni *pitch* sonori come prime consonanti. Inizia con ciò un percorso culturale ben diverso da quelli inerenti alla scrittura geroglifica, ideogrammatica, dove tramite il disegno si propone un concetto, si evoca un'intera immagine, una situazione, un sentimento. L'alfabeto invece è discretezza, suddivide il continuo del linguaggio in atomi *insignificanti*, in bits, le lettere. Questo è un passaggio di astrazione straordinaria compiuto dall'uomo, un modo di rappresentare l'interazione linguistica che assolutamente non esisteva prima e che marcherà la cultura umana, come (ri-)costruzione del significato a partire da segni elementari e semplici, senza significato, in sé astrattissimi, quindi. Inoltre, ed è cruciale, si ricostruisce il significato tramite il suono: l'alfabeto è fonetico. Il senso è dato dalla riproduzione del suono, non dall'evocazione di un'immagine o di un concetto, un'immensa rivoluzione. In termini informatici, il fonema è il compilatore dell'alfabeto e produce il significato. L'evocazione del concetto o dell'emozione, del dio, tramite il disegno, il geroglifico o l'ideogramma, si fa in silenzio. L'ideogramma/segnale stradale impone il senso, un ordine, un divieto, nell'immediatezza visiva di una evocazione significante: si capisce, si agisce subito, senza produrre suoni, neppure mentali. Se l'indicazione che sbarra, per dire, la svolta a destra con segno evocatore, è invece scritta, come spesso in USA, pronunciamo (è indispensabile) almeno nella nostra mente le parole *no right turn*. Produrre un fonema, solo mentale nella lettura silenziosa, è necessario per arrivare ad un significato e tutti sappiamo la difficoltà del primo sillabare infantile, necessariamente ad alta voce, per imparare (sembra che solo nel III o IV secolo si sia inventata la lettura silenziosa: prima l'uomo occidentale leggeva sempre ad alta voce). La notazione musicale moderna percorrerà la stessa strada ed il muscista esperto sente nella mente la musica che legge, anche in silenzio, come noi alfabetizzati sentiamo le parole significanti, perché risuonanti.

2. L'elementare e il complesso

Con questi miei cenni al ruolo dell'alfabeto ho ripreso le osservazioni dettagliate e profonde di Herrenschmidt, a Parigi, e Sini, e la sua scuola, a Milano, nonché di altri autori, pure citati in [6]: la frantumazione alfabetica orienterà la cultura umana in una maniera molto forte; vediamo, in breve, come e perché essa ha a che vedere con l'Informatica.

L'alfabeto è di straordinaria efficacia, e, come delle «rotaie» per forza e direttiva, canalizza, organizza il pensiero, la struttura della conoscenza. In primo luogo, esso introduce una forma originaria di dualismo: *qui* la notazione, *lì* il significato, da raggiungere per mezzo del fonema, ma ben indipendenti (nell'ideogramma il significato

è immanente al disegno). Poi, si afferma la concezione per cui, per capire il mondo, bisogna frantumarlo in componenti *elementari* e *semplici*. Democrito denota gli atomi con lettere alfabetiche: l'universo è costruito a immagine della nostra invenzione, cioè dell'alfabeto, e si forma per composizioni di componenti elementari e semplici, indivisibili, come le lettere.

Ancora oggi il genoma è annotato con lettere alfabetiche. Entrambi, gli atomi o il genoma, si combinano fra loro e, *voila*, il *pop out*, dell'oggetto fisico, del fenotipo, del comportamento; così come componendo e mettendo insieme le lettere, tramite il fonema, emerge il significato. E l'uomo proietta, ancora una volta, questo modo di ricostruire e raccontare il mondo, nell'assoluto: dice che Dio (o l'Evoluzione) ha inventato il mondo e la vita nel modo in cui egli costruisce il senso con la scrittura alfabetica, giustapponenedo segni senza significato. Di nuovo, l'alfabeto è efficacissimo e straordinario, ma non è uno strumento neutro, impone per la sua forza i paradigmi che saranno all'origine della scienza occidentale ed ancor oggi sono rivisitati nella scienza contemporanea. In particolare, dicevo, propone il paradigma che Descartes più di ogni altro ha innalzato a punto centrale del conoscere: le componenti elementari della costruzione di conoscenza devono essere molto semplici, anelli indecomponibili di una catena razionale, il ragionamento «cartesiano». E le lettere in sé sono indecomponibili (elementari) e molto semplici, non hanno significato, ma messe insieme producono il significato, che può essere molto complesso.

Tale è l'approccio alla scienza di Democrito, dicevo, ma anche, insisto, di Aristotele, di Descartes: l'intellegibilità è data dallo scomporre l'universo in atomi e il discorso sull'universo in anelli *elementari* e *semplici*. È la scomposizione massimale, atomica, degli elementi che rendono il mondo intelligibile e il discorso rigoroso. Così lavorano Galileo e Newton; e tutta la scienza moderna costruisce conoscenza, con incredibile efficacia, a partire dall'elementare e semplice. È stata molto più produttiva di qualsiasi altra scienza (penso ai cinesi, ad esempio) soprattutto, ma non solo, nel fare macchine. Gli orologi si fanno così: si prendono ingranaggi e pulleggie semplici e si fanno degli oggetti composti, complessi, incredibilmente complessi come sapevano fare gli orologiai europei del Settecento. E così i computer: le porte logiche ed le componenti elementari sono semplicissime, i linguaggi di programmazione sono composti di atomi linguistici *elementari* e *semplici* e con essi si fanno sistemi e programmi di immensa complessità.

Tuttavia, oggi, ci troviamo di fronte una enorme difficoltà, una nuova sfida di conoscenza: nei due campi che più degli altri sono all'avanguardia, sul fronte difficile del conoscere, la biologia e la microfisica, *l'elementare risulta molto complesso*; questa è la grande sfida alla nostra comprensione, per noi così alfabetizzati. Proprio perché siamo culturalmente nati con l'alfabeto, ci troviamo di fronte a un modo difficilissimo dell'intelligibilità. Si dà infatti il caso che le corde (o stringhe) e i fenomeni di non separabilità e di non località propri della fisica quantistica sono di estrema *complessità* e riguardano componenti *elementari* della materia. E allora, il nostro proiettare l'alfabeto sul mondo, le lettere-atomi di Democrito, improvvisamente trova un ostacolo, per

ora, insormontabile (in breve: non sappiamo capire la microfisica in termini classici o relativistici). Lo stesso nell'analisi del vivente: la cellula, componente elementare del vivente (se la si taglia è morta, non è più vivente), è molto complessa e va colta nella sua unità.

Alcuni biologi (Gould, fra i tanti) dicono che una cellula eucariota è «complessa» come un elefante. In effetti, all'interno vi si trovano le stesse cascate proteiche, lo stesso tipo di produzione di energia (mitocondria, metabolismo…), una strutturazione in organi ed organelli assolutamente analoga a quanto avviene in un metazoo. Un aspetto della complessità, quella oggettiva, è cioè simile nell'elefante e nella cellula eucariota. Un animale è certo più complesso di una cellula dal punto di vista fenotipico, ma questa è un'altra nozione di complessità (morfologica).

La nuova sfida, la complessità dell'elementare, è un muro concettuale per la nostra peraltro efficacissima scomposizione alfabetica e digitale del mondo: facciamo e faremo fatica a superarlo. Proprio come in microfisica, dove manca l'unità con il «campo» classico o relativistico, così facciamo fatica ad unificare il «campo» del vivente (che peraltro non abbiamo ancora ben definito) con le attuali teorie biochimiche, con le teorie che prendono le macro-molecole e le basi per parole ed alfabeto. Una riflessione a riguardo, grazie anche, per dualità, all'informatica digitale, può forse aiutarci.

3. Imitazioni e modelli

Torniamo allora al digitale. È dunque la forza della cultura alfabetica che ci ha dato, come sua ultima espressione, questa macchina, il computer, il massimo dell'invenzione umana, alfabetica e 'cartesiana'. È alfabetica, dicevo, innanzitutto perché tutto vi si scompone in 0,1, alfabeto di base molto semplice, in cui ancora una volta l'elementare è semplice, semplicissimo, per poi diventare molto complesso, per composizione. Ed è 'cartesiana' perché è il luogo massimale del dualismo cartesiano, realizzato dall'idea di Turing del '36 di dividere il software dall'hardware. Le macchine elettromeccaniche che esistevano allora e sono rimaste in uso fino agli anni '50, non avevano un *software* distinto dall'*hardware*. Vi si implementava, per dire, la moltiplicazione e questa rimaneva scritta negli ingranaggi, le sue regole erano iscritte nell'*hardware*, costruito ad hoc. Erano concepite come gli orologi di duecento anni prima, solo più complesse.

L'idea di Turing, che in questo ha alcuni predecessori, è di distinguere nettamente, matematicamente, nella sua Macchina astratta, *l'hardware*, materiale fisico *multi-purpose*, dal *software*. Nasce allora la teoria della programmazione, del tutto indipendente dall'*hardware*, dall'elettronica specifica. Idea essenziale a riguardo e che rende l'Informatica possibile, è la portabilità del *software*, nella sua indipendenza dall'*hardware*: si scrive un programma, lo si porta dall'una all'altra macchina e funziona. Lo si può vendere. Esiste un mestiere, che ho praticato a lungo, quello del logico matematico in teoria della programmazione, che è totalmente indipendente dall'analisi dell'*hardware*.

Naturalmente, per chi è monista come me, questo non ha nulla a che vedere con

il mondo, tanto meno con il vivente: è piuttosto l'immagine moderna del dualismo cartesiano anima-corpo, con tanto di metempsicosi (il trasferire programmi e sistema operativo da un computer, morente, ad un altro), che ha gran successo in Intelligenza Artificiale ed in brutti film di fantascienza. Ma riconosco che tale paradigma è ricco di conoscenza, iniziata con la costruzione, dicevo, dell'alfabeto, forse la prima esperienza veramente dualista dell'uomo: segno insignificante e significato, ben distinti. E ricordo ancora Aristotele. Aristotele accenna una teoria della memoria e del ragionamento basata sull'alfabeto in cui, sostiene, lo svolgersi del ragionamento è come il marcarsi, l'imprinting di «segni alfabetici nel corpo, come su una tavoletta di cera»[1]. Credo che la macchina «di Turing» andrebbe chiamata «di Aristotele-Turing»: sono i segni alfabetici che consentono il ragionamento, con la loro dinamica puramente formale, indipendente dal significato, il pensiero è nelle *stampe mobili di segni*. È questo il modello alfabetico del ragionamento di Aristotele e Turing: le lettere che si muovono e si stampano nella materia (vivente, come sulla cera), o sul nastro di una Macchina di Turing, prototipo del computer moderno. E da ciò si arriva alla macchina che rappresenta tutto, tramite il ragionamento cartesiano, atomista, susseguirsi di lettere senza significato.

Questo modo di intendere l'intelligenza umana (ed animale) canalizza lo sguardo sul reale con efficacia immensa, ma è *biased*, ha cioè un pregiudizio molto forte, risultante da una parte dai suoi aspetti di dualismo (feroce direi) e dall'altra dal proporre l'intelligibilità solo e sempre tramite la riduzione all'elementare massimalmente semplice, sequenze di segni/atomi ultimi e semplicissimi, senza significato. Di nuovo, questo è stato un paradigma ricchissimo per la conoscenza fisico-matematica, in particolare, ma un paradigma che oggi sbatte contro il muro di questo *elementare molto complesso*, non alfabetico, che incontriamo in fisica quantistica e in biologia, ricco dell'intricazione e delle circolarità causali proprie a questi due ambiti fenomenali.

La prima conseguenza da trarre da queste considerazioni è un invito a molta prudenza, nell'uso del computer come strumento di intelligibilità. Non bisogna cioè fare come alcuni colleghi, anche in scienze naturali, che prendono per buono tutto quello che vedono sullo schermo digitale, i modelli che la macchina permette. Oggi la ricchezza della simulazione digitale è tale da meritare un'analisi fine, anche epistemologica, proprio per fare meglio e di più.

Vorrei notare che Turing stesso introduce al riguardo una fine, ma implicita distinzione fra «imitazione» e «modello», intuendo, dopo il 1948, un limite intrinseco alla sua macchina, che, nel '50, dirà «laplaciana». Per capire cosa intendesse, prendiamo un esempio classico, il doppio pendolo. Si tratta di un oggetto fisico fortemente sensibile alla condizioni iniziali. Se lo andate a cercare su Google, troverete alcune pagine di una trattazione matematica nel continuo, due equazioni, molto informative, che ne determinano il movimento: due asticelle attaccate con uno snodo, due pesi… matematicamente due sole variabili, una sola legge, la gravitazione, eppure il caos. Dal punto di vista dell'intelligibilità, chi conosce i sistemi non-lineari capisce subito che quell'artefatto è molto sensibile ai dati iniziali (al matematico lo possono dire i

cosiddetti coefficienti di Lyapounov del sistema). Se si lancia il pendolo su certi valori iniziali, inevitabilmente nell'*intervallo* della misura fisica possible, e poi lo si rilancia, nello stesso intervallo, quello dell'osservabilità, una variazione, una fluttuazione al di sotto dell'osservabile (ovvero non misurabile, la fluttuazione termica ad esempio, che è sempre presente) basta a far fare al doppio pendolo un percorso completamente diverso. Il doppio pendolo, macchina perfettamente deterministica (è determinata da due sole equazioni!) è sensibile a minime variazioni: un tipico sistema determinista caotico, come ce ne sono tantissimi[2].

Si osservi invece la simulazione informatica[3]. Si vedono allora benissimo traiettorie dense: grazie alla simulazione, si può far oscillare il pendolo abbastanza a lungo e si può osservare che esso tende a percorrere tutto lo spazio delle traiettorie possibili. Questo è un aspetto del caos. Tuttavia, quando si preme «restart» (si rilancia il pendolo sugli stessi dati iniziali), esso ripercorre esattamente la stessa traiettoria. Questo, invece, con un pendolo fisico, vero, è assolutamente impossibile. Se si ha a disposizione un buon pendolo, sufficientemente insensibile all'attrito, ma materiale, non virtuale, la fluttuazione termica, come dicevo, che è inerente al processo fisico, basta a farlo andare su un'altra traiettoria, se reinizializzato. Quindi quella imitazione egregia che ci dice tante cose, utilissime, in realtà cosa ci propone?

Da una parte, ci mostra la densità delle traiettorie, tipica del caos deterministico, ma dall'altra ci fa perdere una informazione essenziale: in un sistema dinamico non-lineare accade innanzitutto che, reinizializzato, il sistema non percorre mai la stessa «traiettoria». E questo per motivi «di principio» inerenti alla fisica (moderna): la misura fisica è sempre un intervallo e la variazione (inevitabile), al di sotto della misura, basta a dare, ben presto, evoluzioni diverse. L'analisi delle equazioni nel continuo fa *capire* tale aspetto aleatorio del caos, mentre l'imitazione computazionale lo fa perdere totalmente: solo trucchi ed imbrogli (pseudo-sincronizzazioni con orologi distanti, generatori pseudo-aleatori introdotti ad hoc) possono imitare, ma non modellizzare il fenomeno fisico. Ovvero possono ingannare l'osservatore della realtà virtuale, come Turing spera di ingannare l'osservatore del gioco dell'imitazione uomo/machina/donna, ma non proporre un «modello» fisico-matematico della possible *struttura causale* del fenomeno fisico, come vorrei spiegarvi.

Per chi ha un po' di sensibilità fisico-matematica è quasi comico vedere una simulazione informatica in cui, dando gli stessi valori numerici di inizializzazione, un doppio pendolo ripercorre *esattamente* la stessa traiettoria, poiché ciò non ha senso fisico. Questa è imitazione, direbbe appunto Turing. Attenzione infatti: tale termine che ho usato in un paio di articoli[4] in realtà è suggerito da Turing, che dopo il '48 inizia ad interessarsi ai sistemi dinamici, e smette di dire che la sua macchina è un cervellone e, nel '50, scrive un articolo su come si possa imitare con la sua macchina un comportamento umano (il gioco dell'*imitazione* fra la macchina e… una donna: si possono distinguere nel dialogo tramite telescrivente? – a Turing non piacevano molto le donne, era omosessuale). Nel '52 pubblica invece un articolo sulla morfogenesi,

proponendo un originalissimo sistema non-lineare di azione-reazione dinamica, in cui dà quel che chiama *modello* del fenomeno fisico in questione. Ovvero, cerca di cogliere o proporre una struttura della determinazione, tramite equazioni che descrivono l'interazione causale nel processo di azione-reazione.

Spero che la distinzione, implicita in Turing e che io ho qui tematizzato, possa essere utile a capire meglio quel che si fa grazie alla macchina digitale: quindi ci torno.

Un modello (fisico-matematico) è un tentativo di esprimere una struttura possible della causalità fisica. Ad esempio, Newton considera il moto (pianeti e gravi) e scrive delle equazioni, fra cui $f = ma$, che ne rendono intelligibile la dinamica. Ovvero, fa una proposta di conoscenza. Per noi, non si tratta di un assoluto (come era per Newton), ma di una proposta, formidabile, che, in questo caso, è la seguente: la forza *causa* un'accelerazione, con la massa come coefficiente di proporzionalità. Propone cioè, con le sue equazioni, una struttura della causalità, *esplicativa* e che in effetti permetterà di dedurre, fra l'altro, le orbite di Keplero. E da lì in poi si sono sviluppati rapporti estremamente interessanti e fruttiferi tra fisica e matematica. Si è imparato a fare proposte organizzative del mondo fisico in termini matematici, come mai prima.

Chi si occupa soprattutto di metafisica (come Newton) pensa che questa sia la realtà in sè; chi è più laico, dice piuttosto: questa è una *costruzione di conoscenza*, con tutta l'oggettività della scienza moderna, ma con gli strumenti concettuali e pratici che le son propri, quindi con la sua dinamicità, con il suo evolvere. Nella relatività di Einstein, quella relazione causale è profondamente modificata ed in un certo senso, si inverte: è l'accelerazione lungo una geodetica in varietà riemanniane curve, semmai, che, producendo un campo, induce una forza; una *simmetria formale*, l'equazione, è rotta in modi diversi (rovesciata, in un certo senso), cambiando l'intelligibilità (e la fisica). Ecco due grandi successi del rapporto fra fisica e matematica, della modellizzazione matematica di fenomeni fisici[5].

L'imitazione è un'altra cosa e Turing lo dice benissimo: l'imitazione è una costruzione che non pretende di rendere intelligibile il fenomeno, esplicitandone (o, meglio, proponendo per esso) una struttura causale (o, meglio, le simmetrie e le rotture di simmetria). L'imitazione *somiglia*, può anche essere indistinguibile, ma non assume nessun impegno riguardo alla causalità, alla intelligibilità fisica di ciò che si osserva ed imita.

Ad esempio, se voi lanciate i dadi o, meglio, una moneta, avrete una serie di 0,1; potete poi *imitare* il processo, la sequenza, con un generatore di numeri aleatori sul computer. Avrete una imitazione in questo senso: la distribuzione di probabilità degli 0 ed 1 è analoga, indistinguibile per una sequenza di ragionevole lunghezza.

Si può dire che questa è un'ottima imitazione, ma essa non ha nulla a che vedere con la modellizzazione del lancio di una moneta. Perché l'uno è un processo di un sistema deterministico, il lancio della moneta, estremamente sensibile alle condizioni al contorno, alla minima variazione dei parametri in gioco, dunque un altro esempio paradigmatico, anche se un po' diverso dai preeedenti, di caos deterministico, e un

paradigma dell'aleatorio per l'altissima sensibilità delle condizioni al contorno. L'altro, lo pseudo-generatore di numeri aleatori in un computer, è un sistema pure deterministico, ma non caotico: il generatore di numeri aleatori che avete sul computer è un programma di una riga, una regoletta, che moltiplica seno e coseno, poi fa un taglio sul *round-off*, sull'arrotondamento, inerente alla macchina, e produce una serie di 0 e 1, distribuiti *apparentemente* a caso. Ma il processo non è affatto casuale, non vi è nulla di propriamente aleatorio, come nel lancio del tutto imprevedibile di una moneta: se voi pigiate «restart», lasciando tutti i parametri identici (cosa ben possible, anzi la più facile), quella presunta successione casuale viene riprodotta identica, secondo la legge/determinazione aritmetica iscritta nel programma, che si svolge nel discrèto. Il processo è laplaciano e perfettamente predittibile, in particolare perché iterabile. Non riuscirete mai ad iterare una stessa successione di 0 e 1, con una seconda sequenza di lanci di una stessa moneta: le strutture causali sono profondamente diverse, anche se l'imitazione è ottima.

La differenza sostanziale risiede nel fatto che la base di dati digitale è *esatta*, ha la topologia naturalmente discrèta, ovvero l'accesso ad essa avviene bit per bit, ben separati. La misura fisica è invece, e per *principi* fisici, sempre un intervallo, ben rappresentato dalla matematica del continuo (dove la topologia discrèta non è certo «naturale»). Nei sistemi deterministici caotici, una fluttuazione/variazione al di sotto dell'intervallo della misura, dunque inaccessibile, induce evoluzioni del sistema radicalmente diverse. Questo, osserva anche Turing nel '50, è teoricamente *evitabile* nella macchina a stati discrèti da lui inventata – e lo è anche in pratica: l'iterazione e la portabilità funzionano[6].

3.1 Modelli, processi ed impredittibilità

La nozione di dinamica caotica è una nozione *matematica*, ovvero[7] si può dare una precisa definizione di sistema dinamico caotico, determinato da una o più equazioni o, più direttamente, da una funzione di evoluzione (un endomorfismo di uno spazio metrico o topologico) con le proprietà elencate[8]. L'*impredittiblità* invece si dà nell'interfaccia fra un processo fisico e la matematica: perché si possa parlare di im*predittibilità*, bisogna che qualcuno cerchi di pre-*dire*, in linea di massima con la matematica, l'evoluzione di un fenomeno (fisico, tipicamente).

Un processo in sé non è impredittibile, senza un tentativo di dire o pre-dire con un qualche sistema matematico; né, d'altra parte, un sistema di funzioni o una funzione matematica, in sé, è impredittibile. Anzi, teoremi importanti dimostrano che ogni problema di Cauchy, una classe amplissima di equazioni differenziali, o, più in generale, ogni sistema ragionevole di equazioni (o funzioni) esprimibili e che ha soluzioni, ne ha di calcolabili. Ed in effetti bisogna proprio cercare con il lanternino per trovare un sistema di equazioni a coefficienti calcolabili, ovviamente, con soluzioni non calcolabili[9]. Ovvero, restando all'interno della matematica, si *calcola* e, se si hanno buoni teoremi di esistenza (ed unicità, se possibile) di soluzioni, si predicono evoluzioni, *punto per punto*,

ogni volta che si forniscano input calcolabili al sistema dato.

La matematica si scrive in linguaggi finitari ed effettivi, persino quando parla di infinito: è molto difficile, si procede con astuzie diagonali o poche altre per dare, matematicamente, un numero, una funzione, non calcolabile. Il problema è appunto nel significato della matematica, ovvero nel rapporto con il processo che si intende formalizzare/modellizzare. O, meglio, nella *misura* che permette di passare dal processo fisico al sistema matematico. Quando essa è un intervallo, non si può fornire al modello matematico un valore esatto, tanto meno un numero intero o calcolabile e, nelle dinamiche non-lineari, l'intervallo input viene «mescolato» ed (esponenzialmente) esteso nell'evoluzione (temporale in generale) rendendo il sistema matematico che modellizza, calcolabile ovviamente, inadatto a predire l'evoluzione del processo fisico, modellizzato. Ciò non toglie che importantissime informazioni *qualitative* rendano la formalizzazione di grande interesse (come geometria dei sistemi dinamici).

Per riassumere, non ha senso parlare di impredittibilità di un sistema matematico, anche caotico, se non in relazione a un (presunto) processo fisico da questo modellizzato: è quest'ultimo che sarà (relativamente) impredittible; la matematica invece è (quasi sempre) calcolabile. Esistono poi sistemi e processi deterministi *e* predittibili, ovvero laplaciani: si possono classificare come tali i processi la cui modellizzazione è ben espressa da sistemi lineari, anche continui, oppure da sistemi le cui basi di dati pertinenti sono discrète. In entrambi i casi, il problema della misura non ha conseguenze importanti (linearità: l'intervallo non viene «mescolato») o non si pone (il discreto: ogni dato è ben separato ed accessibile).

Nel secondo caso, la differenza – insisto e riassumo – è dovuta alla natura *esatta* della base di dati discrèta, *digit* accanto a *digit*, ben separati fra loro, senza problema della misura; la sua topologia «naturale» (e questa parola ha senso matematico) è quella discrèta, essa isola ogni punto dall'altro e permette di accedervi con esattezza. Non solo, ma l'iterazione, che è poi una forma di predizione, è un principio costitutivo dell'Informatica, figlia dell'Artimetica Formale: la ricorsione primitiva, di Herbrand e Gödel, nel '30-'31, quando nascono le prime idee sulla calcolabilità, è iterazione (più l'*updating* di un registro); la portabilità del software è pure questione di iterazione: si vuole poter rilanciare identicamente un programma, pagato salatamente, perché faccia e bene sempre esattamente la stessa cosa – e guai se non lo fa! Invece, la misura fisica (classica e relativistica) non è un numero intero, ma è sempre un intervallo, che meglio rappresentiamo con la topologia «euclidea» nel continuo: una fluttuazione/variazione al di sotto di tale intervallo, dunque inaccessibile, *causa*, in sistemi deterministici non-lineari o caotici, evoluzioni diverse. E nelle dinamiche non-lineari quel che più interessa è proprio il ruolo della variazione, se possibile al di sotto dell'osservabile. Ovviamente queste due diverse strutture matematiche costruiscono immagini diverse del mondo; entrambe efficacissime, per i loro scopi, ma profondamente diverse.

Chi non fa la distinzione ed identifica quel processo fisico e la sua matematica, un doppio pendolo o il lancio di una moneta che capiamo meglio come dinamica

nel continuo, con l'imitazione computazionale discrèta, fosse anche arricchita di belle immagini virtuali di una moneta che rotola, perde l'intelligibilità di entrambi i processi. E non riesce a far meglio. Come allora «far meglio» ed introdurre dell'aleatorio in una macchina a stati discreti? Le reti ed i sistemi concorrenti permettono imitazioni migliori dell'alea: una rete di macchine a stati discrèti, il *web* tipicamente, o un sistema di processi *concorrenti* (che concorrono ad uno stesso processo ed a priori non sincronizzati da un orologio newtoniano assoluto e comune), distribuiti nello spazio, sono appunto immersi nello spazio-tempo che meglio intendiamo con la matematica del continuo. Gli sfasamenti spazio-temporali, persino di tipo relativistico se la rete è distribuita sulla faccia della Terra, presentano fenomeni propri di «dinamiche continue». Tuttavia, ovviamente, se si simula con l'aleatorio di reti o della concorrenza l'aleatorio *locale* dovuto alla fluttuazione termica in un doppio pendolo, si migliora enormemente l'imitazione discreta, ma, appunto, si continua a fare imitazione: non si coglie cioè quel che consideriamo *causa*, locale, inaccessibile alla misura, della variazione aleatoria. Ma già si fa meglio, importando nel discrèto, che itera, l'aleatorio classico o relativistico dello spazio-tempo, che non itera.

Si osservi, per inciso, che Turing per due volte nell'articolo del '50 dice «la mia macchina è laplaciana» poiché, in essa, la determinazione implica la predittibilità – anche nelle macchine concrete insiste. E qui riprendiamo: la predizione è possible, se non altro tramite l'iterazione, anche se trucchi ed astuzie, non inerenti alla teoria del calcolo sia sequanziale sia concorrente, possono ben imitare l'aleatorio. Invece il suo sistema per la morfogenesi del '52 è profondamente non-laplaciano – ed è la sua proprietà più importante, sottolinea Turing: la dinamica delle forme varia sempre, è deterministica ed impredittibile, perché altamente sensibile alle condizioni al contorno.

Poiché più sopra ho parlato di microfisica, vorrei allora osservare che oggi si può arricchire un computer con dell'aleatorio proprio della Meccanica Quantistica, modificando così ancor più profondamente la natura di questi nostri calcolatori digitali, deterministici in senso laplaciano. Ovvero: oggi è possibile migliorare l'imitazione computazionale dell'aleatorio classico (i dadi, la moneta), con forme di aleatorio «intrinseco» grazie alla fisica quantistica. Si può comprare a Ginevra una scatoletta che produce 0,1 secondo lo *spin up* e lo *spin down* di un elettrone. In questo caso la teoria standard dice: la probabilità è «intrinseca», poiché è conseguenza teorica della misura quantistica, che è sempre un valore di probabilità, e del principio di indeterminazione proprio della fisica quantistica. Dal punto di vista dell'analisi della sequenza di 0 ed 1, la distribuzione di probabilità è analoga. Ma la differenza è radicale rispetto sia al calcolatore digitale classico, sia al lancio della moneta (le probabilità quantistiche sono «intricate» [2]). Si tratta allora di tre strutture della casualità diverse che possono al più somigliare per imitazioni reciproche possibili, ma null'altro.

4. Il calcolo, la fisica ed il vivente

Spero che tutto quanto abbiamo appena accennato, la natura dualistica ed alfabetica di queste macchine straordinarie, la specificità del loro regime causale, «laplaciano» come dice Turing, la differenza fra imitazione computazionale e modello fisco-matematico, aiuti a cogliere il ruolo immenso ma singolare dell'informatica nelle scienze.

Quando si vedono degli uomini che si muovono o delle cellule che si sviluppano in un contesto virtuale, spero che sia chiaro perché sembrano subito un po' strani. La dinamica delle immagini, il senso estetico direi, lo fa intuire di primo acchito: essi, al fondo, iterano e questo dà il senso di qualcosa di … anti-estetico. Infatti sapete benissimo che, se fate *restart*, rifaranno esattamente gli stessi gesti, gli stessi identici movimenti (quando mai una folla di comparse o di monocellulari in normale agitazione, se li fate ripartire nel loro brodo di cultura, farebbe esattamente le stesse traiettorie, gli stessi identici movimenti?). Il creatore di realtà virtuale astuto, se glielo chiedete, imiterà la variazione fisica (ed animale) con trucchi vari (generatori pseudo-aleatori economici, classici, o sfasamenti temporali in *multi-tasking* e concorrenza), ma spesso non ci pensa ed il *restart* lo lascia di stucco. E non È questione, qui, di vivente e «volontà» o *similia*: ho visto di recente bellissime immagini virtuali di palline che si scontrano - ma… pigiato il tasto di *restart*, hanno ripercorso esattamente le stesse traiettorie, gli stessi urti, identici. Provate a far correre ed urtarsi un nugolo di palline, vere, fisiche: osserverete ogni volta una dinamica diversa (il programmatore ha subito migliorato l'imitazione in questione, con dell'aleatorio di rete).

Bisogna allora stare attenti, perché quel che cerco di raccontare è un problema evocativo, dell'immaginazione, di grande rilievo: si tratta del gioco fra rappresentazione, modello ed imitazione delle dinamiche, al cuore dell'intelligibilità scientifica e, direi, umana. Per non parlare poi dei movimenti umani che non sono palline e si complicano di una serie di altri elementi causali, come in tutto il vivente. Questo, per l'intelligibilità, è un problema enorme, non totalmente analizzato. La simulazione computazionale costa molto meno del fare un esperimento; così, tanti fisici rinunciano a fare esperimenti e lavorano solo ad implementazioni. La simulazione della turbulenza, che è un caso estremo di caos, permette di risparmiare sulle camere a vento e la sua stessa iterabilità è una ricchezza: il giudizio a vista, qualitativo, dell'esperto può richiedere più iterazioni per apprezzare il comportamento di un'ala d'aereo o una fusoliera; e piccole variazioni indotte danno un buon apprezzamento della sensibilità della dinamica (ma non si riesce ad analizzare ala e fusoliera assemblati: il virtuale in tal caso si allontana troppo dal fenomeno, troppo complesso).

Il dibattito in fisica al riguardo si sta approfondendo, con intelligenza: teoremi di stabilità o di *shadowing* (la traiettoria fisica o continua «segue» quella virtuale), in alcuni casi, pochi, esplicitano quel che ci insegnano le simulazioni discrete, le analogie e le differenze rispetto a processi che capiamo meglio con l'analisi del continuo non-lineare.

Per riassumere, nell'imitazione computazionale si può avere un distacco, molto originale, dal mondo, una possibile ricchezza, se viene ben capito: il mondo digitale è una straordinaria invenzione, di rilievo quanto ed in continuità con l'alfabeto, come dicevo. Ma dobbiamo saper stare nel nostro sapere, cogliere la sua originalità rispetto alla storia precedente o il modo in cui il nostro sapere ogni volta ci ripropone, diverso, uno sguardo sul mondo; come l'alfabeto, che non c'era prima della sua audacissima invenzione, il computer è una proposta totalmente originale dell'uomo, plasma il nostro modo di costruire la conoscenza, lo marca con la sua propria logica costitutiva, il suo proprio *regime causale*.

Siamo in grado oggi di costruire, per imitazione, strutture assolutamente fantastiche che, se del tutto statiche, sono veri modelli. Tuttavia, dev'essere chiaro che ogni volta che c'è un pò di dinamica, l'imitazione può differire totalmente dalla modellizzazione. Basta qualche elemento di una dinamica non-lineare o un po' di umano (o animale). Infatti, nelle dinamiche fisiche (e biologiche) interessa anche, e molto, la variazione; in particolare, la variazione al di sotto dell'osservabile, che modifica rapidamente anche i processi osservabili. Il computer, che ha un unico livello «intrinseco» di osservabilità, quello dell'arrotondamento digitale, proprio della sua struttura di dati discrèta, non sa cogliere tale variazione che è quel che più conta nelle dinamiche sensibili, e per questo esso può iterare in maniera sempre identica.

Nell'imitazione del vivente il problema è particolarmente acuto. Se si fa l'animazione virtuale del vivente, si ha subito l'impressione di qualcosa che non va, come dicevo, perché la *variabilità* è al cuore del vivente, proprio come l'iterazione identica è al centro del calcolo digitale. Quel che conta nel vivente è che una cellula non è mai identica a una cellula madre; poi, selezione darwiniana. A livello cognitivo, mai un'azione è identica ad un'azione precedente, simile semmai, prossima, mai identica. Il divario in questo caso è particolarmente marcato, anche rispetto alla nozione fisica di variazione, poiché la variabilità include l'individuazione del vivente (la sua «specificità» rispetto alla «genericità» dell'oggetto sperimentale fisico [1]).

Sebbene nel vivente esista un frammento chimico molto rigido di memoria filogenetica, il DNA, esso è solo una componente della dinamica ontogenetica: insieme all'RNA ed alle interazioni non-lineari reciproche, è all'origine delle cascate proteiche che han luogo durante la mitosi, la meiosi e la embriogenesi, in una delle dinamiche più complesse e meno capite che si conoscano. Il DNA è una componente importantissima, ovviamente, dal punto di vista ereditario, ma, dalla struttura della cellula al contesto epigenetico, molto altro contribuisce all'ontogenesi; in particolare, une miriade di dinamiche irrepetibili ed irreversibili, che sono al cuore della variabilità del vivente. Anche in questo caso il presunto alfabeto democriteo e la nozione di programma sono assolutamente insufficienti (*causalmente incompleti,* cfr. [6]) per capire la dinamica biologica, in cui, si diceva, processi non reversibili e non iterabili contribuiscono in modo essenziale a produrre la variabilità ontogenetica e filogenetica, senza le quali non ci sarebbe evoluzione, né, quindi, vita.

E qui vorrei insistere su una ulteriore distinzione e precisazione, che riguarda la difficoltà, più generale, di rendere intelligibile il vivente con i nostri, attuali strumenti matematici. La matematica è una scienza degli invarianti e delle trasformazioni che le preservano. Si comincia dalle rotazioni, traslazioni ed omotetie di Euclide che perservano le simmetrie, fino ai gruppi di trasformazioni ed i loro invarianti di Klein, come classificazioni delle diverse geometrie riemanniane (euclidea, ellittica, iperbolica). La Teoria (matematica) delle Categorie lo spiega bene, individuando oggetti (invarianti) e trasformazioni che li preservano (morfismi, funtori, trasformazioni naturali). La matematica del discrèto, e quindi l'informatica, aggiunge a questo l'invarianza per iterazione, sorta di simmetria per traslazione temporale. Che dire quando si applica la matematica, così costruita, all'analisi del vivente? Dove trovare altrettanta stabilità concettuale e fisica? A livello fenomico, il vivente esiste proprio per proprietà opposte, si diceva: accanto la «stabilità strutturale», la variabilità è forse l'invariante principale, senza di essa niente «deriva filogenetica», ovvero niente evoluzione. E neppure ontogenesi, con la variabilità e l'irrepetibilità dei processi pertinenti. La stabilità strutturale non ha le caratterische dell'invarianza matematica, malgrado i tentativi di René Thom di coglierla con gli strumenti della Teoria delle Singolarità (ed i successi nell'analisi della morfogenesi di alcuni organi, nella fillotassi in particolare).

Lo sforzo che alcuni stan facendo, compreso nel mio minuscolo gruppo di ricerca, è di individuare invarianti propri al vivente e poco descritti dalle attuali teorie fisico-matematiche. Ne parliamo nel libro citato, dove si mette l'accento su grandi invarianti temporali persino inter-specifici, nonché su una nozione derivata dalla fisica, ma impropria per le dinamiche fisiche note, quella di «stato critico esteso». Il vivente, congetturiamo e cerchiamo di esprimere con rigore, starebbe in una situazione «matematicamente singolare» – nel senso tecnico, usualmente puntuale in matematica, ed invece *estesa*, nel suo caso, ad uno spazio di misura non nulla, un intervallo spazio-temporale.

5. Ma… i processi naturali calcolano?

Facciamo di nuovo un passo indietro nella storia. Negli anni '30, a partire dai lavori di Herbrand e Gödel, numerosi sistemi formali per la calcolabilità hanno permesso di rendere rigorose le intuizioni dei padri fondatori della Logica Matematica (Peano e Hilbert fra gli altri): la certezza deduttiva della matematica è nella sua *potenziale maccanizzabilità*. Si trattava allora di associare alla deduzione formale, così chiaramente definita da Hilbert e dalla sua scuola, un'adeguata nozione matematica di *calcolo effettivo* o «potenzialmente meccanizzabile»; questo nell'ambito di sistemi basati sull'Aritmetica, che Frege e Hilbert avevano messo al cuore del progetto fondazionale e per buoni motivi: la crisi profonda che aveva sconvolto le certezze geometriche dello spazio euclideo.

Negli anni successivi, Church, Kleene ed altri proposero ulteriori sistemi logico-formali atti a cogliere questa nozione originariamente informale, la 'deduzione effettiva'. Tuttavia la svolta, premonitrice dell'Informatica, avviene negli anni '35-36: allora

Turing inventa la sua «macchina» astratta e Turing e Kleene dimostrano l'equivalenza dei diversi formalismi per il calcolo effettivo, tutti estensioni funzionali od insiemistiche dell'Aritmetica, ovviamente. Ma perché la Macchina di Turing (MdT), al di là della dimostrata universalità (invarianza) dei sistemi di calcolo, avrà un ruolo così importante negli sviluppi successivi dell'Informatica? In fondo, alcuni degli altri formalismi sono migliori, da molti punti di vista, e più interessanti dal punto di vista matematico.

Il lambda-calcolo di Church, ad esempio, possiede interessantissimi «teoremi propri» (Church-Rosser, Normalizzazione…) che correlano con rigore la nozione di calcolo a quella di prova formale – scopo di questi lavori (la prova certa è un calcolo effettivo, si diceva). La MdT invece non ha propri teoremi interessanti e se è utlizzata in dimostrazioni, di complessità ad esempio, ci si affretta a provare che esse sono indipendenti dal formalismo di calcolo scelto (modulo traduzioni «semplici»). Ma il sistema di Turing esprime meglio di chiunque altro cosa è il calcolo effettivo: è una scrittura-riscrittura del *numero* e delle stesse *regole* per il calcolo. La «Logical Computing Machine» – come la chiama l'autore nel '36 – scrive o cancella 0 od 1, sposta a destra o sinistra di un passo una testina di lettura-scrittura su di un nastro, cambiando ad ogni passo stato interno, sulla base di un insieme finito di istruzioni (ecco la distinzione, già menzionata, fra *hardware*, nastro e testina, e *software*, le istruzioni: scrivi-cancella, sposta a destra-sinistra, cambia stato).

Ispirato da Gödel, Turing codifica con 0 ed 1 le stesse istruzioni del calcolo: sul nastro si possono scrivere e *modificare* le istruzioni stesse. Una macchina sul cui nastro sono scritti istruzioni ed input ed è programmata per applicare le prime ai secondi, la Macchina Universale, sarà il modello dei moderni compilatori e sistemi operativi, in breve dell'Informatica ancora attuale. Per questo il suo rilievo matematico e pratico: l'esplicitazione del calcolo nelle sue componenti elementari e semplici, come trasformazione del numero e dei programmi sui numeri, anche essi codificati come numeri. E questo perché il *calcolo è la scrittura-riscrittura del numero*.

Che senso ha allora chiedersi se questo tavolo, una cascata, un fulmine, un grave che cade, un doppio pendolo, una corrente elettrica, un albero che cresce, una dinamica quantistica… un qualsiasi processo naturale, calcolano? Per farli calcolare bisogna, in primo luogo, decidere dove è l'input (quando inizia il calcolo) e dove termina (l'output), quindi associare a essi dei numeri. Ovvero, bisogna associare quegli stati/istanti prescelti a dei numeri con la *misura* fisica. Dai tempi di Poincaré e di Planck, torno a ricordare, abbiamo capito che questo processo, la misura, è di enorme rilievo in fisica: l'evoluzione di una dinamica caotica può *casualmente* dipendere da fluttuazioni o variazioni al di sotto della misura possibile; l'indeterminazione quantistica, una proprietà della misura, ha cambiato la microfisica. Credo che bisogna senz'altro dire, in prima approssimazione, che

nessun processo naturale calcola.

Siamo noi che con un percorso che va dall'invenzione del numero, radicata certo

su pratiche pre-umane, animali, del «piccolo-conteggio», quindi della scrittura del numero e di quella alfabetica che sola ha permesso di concepire la codifica numerica di lettere insignificanti (nei numerosissimi trattati di guerra cinesi non esiste ovviamente criptografia, presente già in Cesare o nella Kabalà biblica: al più si evocava un concetto al posto di un altro, per confondere il nemico non informato del gioco di ambiguità) siamo arrivati a questo capolavoro di dualismo cartesiano alfa-numerico che è la MdT.

Poi, siamo stati in grado di trasferire questa invenzione logico-matematica in macchine fisiche, in processi artificiali del tutto originali, che hanno la rara qualità, ottenuta con grande intelligenza grazie a valvole e transistor, diodi e chip, di evolvere a *stati discrèti*. Così, ad ogni istante l'accesso ai dati è esatto, la misura è certa (e facile), non presenta i problemi delle dinamiche continue, come già osserva Turing, con lucidità rara, nel suo articolo del '50 (solo degli Intelligenti Artificiali potevano non cogliere il punto); né quelli dei processi quantistici. In breve, per «far calcolare» processi non laplaciani, dinamici o quantistici, bisogna effettuare misure e questo è una questione nodale in entrambe le teorie pertinenti. Il problema, enorme, della computazione quantistica (*Quantum Computing*) è proprio che *ciò che si calcola non è quel che si misura*; ovvero, l'evoluzione di un sistema, descritta ad esempio con le equazioni di Schrödinger e dunque calcolabile, avviene in spazi di Hilbert a valori complessi ed i calcoli formali, le somme ad esempio che esprimono la sovrapposizione quantistica, si effettuano sul campo dei numeri complessi; la misura, come valore di probabilità, avviene invece sul campo dei numeri reali, prendendo i moduli dei valori complessi e perdendo così la struttura stessa dell'intricazione. Sta qui la barriera concettuale che rende ancora non attuale l'uso numerico dei fenomeni di sovrapposizione o intricazione quantistica: siamo cioé ancora teoricamente lontani dall'ottenere, dopo la misura, risultati numerici (reali) che utilizzino appieno la non-separabilità quantistica (l'apporto originale della computazione quantistica).

È ovvio che alcuni processi, laplaciani ad esempio, permettono un'associazione facile ed efficace di numeri al processo e che quindi si può dire che essi «calcolano»; o che in chimica i processi d'interazione molecolare possono essere esaustivamente descritti da sistemi a «stati discrèti» (atomo per atomo), tanto da rendere gran parte della chimica teorica un vero «sistema di riscrittura alfabetico». Ciò non toglie che il problema della misura, sfida della fisica moderna ed audacia inventiva dell'Informatica a stati discrèti, che può non preoccuparsene al suo interno, è quel che dà un senso preciso ad elucubrazioni altrimenti vaghe sul calcolo e sulla natura: per associare un processo fisico ad un calcolo (numeri input/output), bisogna passare per la misura.

Ed è uno dei motivi dello scarso successo dei calcoli analogici. Nato prima della calcolabilità sul discrèto alla Turing, l'Analizzatore Differenziale di V. Bush al M.I.T. era, ad esempio e sin dal 1931, uno splendido sistema di integrazione analogica (un po' come una superficie «calcola» l'integrale di una curva): fu poi sviluppato come il GPAC (*General Purpose Analog Computer*) da Shannon, nel 1944. Ma, di nuovo, l'approssimazione della misura, la scarsa efficacia del processo continuo soggiacente,

l'incertezza della iterabilità e portabilità, ne han bloccato gli sviluppi. E questo accompagnato, probabilmente, da altri motivi: l'efficacia della tecnologia digitale (la sua compressibilità e codificabilità svariata: come portare in analogico su un cavetto telefonico l'equivalente di 20 mb fornendo così TV digitale, Internet e telefono illimitato?), ma anche, forse, il pregiudizio aritmetico-linguistico. La certezza matematica è nell'Aritmetica, dicono tutti i fondazionalisti a partire da Frege; la conoscenza è nel linguaggio, dicono Frege ed i filosofi analitici, soprattutto dal podio di Vienna; il linguaggio, frantumato nell'alfabeto, lo si codifica in Aritmetica (Gödel e Turing). Ed il circolo virtuoso-vizioso si instaura egemone, escludendo il resto: Aritmetica - Linguaggio - Macchina (aritmetica) e ritorno.

Per tornare infine all'alfabeto, pensare che i processi naturali calcolano è come credere che, parlando, produciamo sequenze di lettere. È una visione «a fumetti» del linguaggio; fumetti occidentali, poichè i bambini cinesi certamente pensano che gli uomini producano ideogrammi, ovvero concetti e suoni, parlando, come nei loro fumetti. Ma in effetti emettiamo un canto continuo, scomposto dai nostri audacissimi antenati altamici in una notazione musicale-alfabetica, che ha incatenato l'un l'altro, grazie al fonema, scrittura e canto. Impresa estremamente convenzionale, pur con profonde radici storiche. Provate a trascrivere un grido o canto animale: nelle quattro lingue che mi vengono in mente, l'abbaiar del cane si trascrive come bau-bau, arf-arf, bu-bu, wuf-wuf. Eppure, ho constatato, i cani abbaiano nello stesso modo nei quattro paesi in questione. La trascrizione del Keshua, lingua andina solo parlata, è stata un'impresa ardua e molto contestata: nella trascrizione in lettere latine (e perché non arabe od ebraiche? Solo contingenza storica…) si forzano fonemi tipicamente spagnoli, plasmando, forzando in rotaie e di fatto trasformando una lingua dalla musicalità, ovviamente, molto originale. No, non produciamo lettere parlando, proprio come i processi naturali non producono numeri né calcolano e la *mediazione della misura* è un nodo cruciale. Il coglier questo punto è essenziale per fare il meglio possibile con la nostra umana e straordinaria invenzione logico-matematica e poi fisica, la macchina aritmetica a stati discrèti, il calcolatore elettronico-digitale. E forse, cominciare a pensare alla … prossima macchina.

6. Interludio mnemonico

Dopo eccessi di evocazioni matematiche, vorrei confortare il lettore con cenni, brevi e più informali, alla *memoria*. È una iattura che si usi la stessa parola per la memoria animale (umana) e le basi di dati digitali. Infatti la differenza è abissale. Quel che più conta nella memoria umana (ed animale) è … l'*oblio*. L'oblio è costitutivo dell'invarianza e, quindi, dell'astrazione concettuale, perché con esso si dimenticano i dettagli, *quel che non conta*.

Mi spiego. Noi non ricordiamo un'immagine, un evento, pixel per pixel, esattamente. Il nostro sguardo o comprensione è, già a monte, *intenzionale*, ovvero ha una *visé*, un obiettivo di comprensione, di lettura del mondo, sempre attivo, e seleziona quel che va

ricordato, quel che interessa. Il nostro sguardo sul mondo è sempre un'ermeneutica. La memoria, poi, evoca, fa rivivere, ricostruendo, ogni volta in maniera diversa, fosse anche di poco, l'immagine, l'evento, selezionando, interpolando, interpretando, calcando quel tratto e non quell'altro. Mai la memoria ci rende esattamente, pixel per pixel, il vissuto. E, così, la memoria contribuisce ad astrarre «quel che conta» e propone, costituisce, degli invarianti, ovvero dei tratti, dei gesti, delle *gestalt*, e, poi, dei concetti relativamente stabili, che il linguaggio e la scrittura contribuiscono a rendere comuni ed a stabilizzare ulteriormente, a rendere relativamente indipendenti da trasformazioni dell'ecosistema. E ricostruisce, appunto, dimenticando gli elementi relativamente irrilevanti, irrilevanti cioè per i nostri scopi, defalcando l'inutile. Così, riconosciamo un compagno di scuola 30 anni dopo per … il sorriso, che è un movimento, per un inclinarsi della testa, una piega che si forma sotto gli occhi quando parla. Tutte dinamiche, tutte di rilievo per il nostro antico rapporto affettivo. Pixel per pixel, quel viso non ha più nulla in comune con l'altro di 30 anni prima: dei movimenti, selezionati come invarianti per noi, intenzionalmente significativi, sono tutto quel che resta. Ma ci basta, anzi è quel che conta: l'aver dimenticato il viso esatto, in tal caso, è fondamentale per riconoscere, perché quel viso ed i suoi dettagli non ci sono più. E questo è l'opposto della memoria digitale, che deve essere esatta: guai se, aprendo un *file* un anno dopo, una virgola fosse fuori posto, guai se ritrovando una pagina web lontana, essa risultasse *scrambled* da una imperfezione di memorizzazione o di comunicazione.

In informatica tutto si fa perché le basi di dati (e la comunicazione) siano esatte, pixel per pixel. Il web (internet), questa straordinaria «memoria» dell'umanità, potenzialmente a disposizione dell'umanità tutta, deve essere esatta: questa è la sua forza. Ovviamente anche il web è dinamico e «dimenticante»: siti compaiono e scompaiono, vengono cambiati. Ma questo per l'intervento umano: la rete di macchine, in sé, *deve* avere una memoria esatta, perfetta. L'opposto della dinamica intenzionale, selettiva, costitutiva e di significato ed invarianza, nella variabilità, nella dimenticanza attiva, che è la memoria animale, in cui l'oblio del dettaglio irrelevante contribuisce a costruire l'invariante che conta, l'intelligibilità stessa del mondo. L'interesse straordinario del web è proprio nel complementare, per la sua orginalità di invenzione umana, a mio avviso importante almeno come l'invenzione della stampa, l'oblio e la dinamica della nostra memoria animale – memoria che già, nell'uomo, il linguaggio, la scrittura e la stampa hanno immensamente arricchito, contribuendo alla sua stabilizzazione.

7. Conclusione: questione di principi

In questa breve presentazione si è cercato di mettere in evidenza alcuni «principi» o elementi fondazionali che presiedono a grandi opzioni matematiche nell'intelligibilità dei fenomeni naturali. Considerato lo scopo della chiaccherata, orientata soprattutto all'Informatica, non si è potuto discutere con cura sufficiente del rapporto diretto e fecondissimo fra matematica e fisica, anche se esso era sempre sullo sfondo del raffronto. In particolare, si è appena accennato alla comunanza dei grandi principi di costruzione concettuale, fra fisica e matematica, che giustificano la ragionevolissima efficacia della matematica in fisica (sono, per così dire, «co-costituite»). E solo questa analisi permette meglio di cogliere i limiti della modellizzazione matematica o informatica in biologia, anche per andare avanti, forse con idee (e strutture concettuali) nuove.

L'individuazione di principi d'ordine o di simmetria, in matematica, o la messa in evidenza del ruolo pervasivo, in fisica, del principio geodetico, come facciamo in [1], va sviluppata proprio per cogliere quel che «c'è dietro» e che unifica o distingue interi rami del sapere, le scelte di metodo e strumenti, esplicite ed implicite, il costituirsi del loro significato o «l'origine», in senso spesso più concettuale che storico, ma anche storico. E questo semmai per *mettere in discussione* questi stessi principi, se necessario e se può portare a rendere intelligibili altri frammenti del mondo.

Certo, da un lato, capire che da Euclide a Riemann e Connes (il grande della geometria della Meccanica Quantistica contemporanea), principi comuni di costruzione, sulla base dell'accesso e la misura allo spazio (dal corpo rigido all'algebra matriciale di Heisenberg, cui fa riferimento Connes), ne fondano l'organizzazione geometrica, rafforza il senso di ciascuna delle teorie corrispondenti, pur cogliendo i cambiamenti radicali di sguardo che ognuno di questi approcci ha saputo proporre; nello stesso modo, mettere in evidenza che il principio geodetico può rendere intelligibile un percorso che va da Copernico e Keplero alle equazioni di Schrödinger (derivabili dall'ottimalità hamiltoniana, come le equazioni di Newton) fa cogliere, in un sol colpo d'occhio, la forza della proposta teorica in fisica moderna, nelle sue svolte successive. D'altro lato, l'operazione «fondazionale» che pure conta per noi è questa riflessione sui principi di ciascuna scienza; «fare un passo di lato», guardarli in prospettiva, anche per rimetterli in discussione, in particolare nel rivolgersi ad altri ambiti scientifici.

È quel che facciamo, del resto, osservando, nel libro con Bailly, come la «traiettorie» filogenetiche (e, in parte, ontogenetiche) del vivente, non vanno più capite come «specifiche» (geodetiche) ma come «generiche» (dei possibili dell'evoluzione), mentre è piuttosto l'individuo vivente che è «specifico». In altri termini, in fisica l'oggetto (sperimentale) è generico (un grave, un fotone … può essere rimpiazzato, nella teoria e nelle esperienze da qualsiasi altro) e segue «traiettorie» specifiche (geodetiche critiche), l'opposto in biologia. Questa è una dualità con la fisica che permette di cogliere la necessità di una teoria propria del vivente, che arricchisca i sottostanti principi fisici – che ovviamente pure partecipano della intelligibilità del vivente. È proprio l'analisi

fondazionale condotta nel libro che consente di sottolineare la forza ed i limiti del quadro teorico fisico-matematico, nonché informatico, il suo non esser assoluto, le frontiere della sua universalità. Un quadro quindi tutto da ripensare al di fuori dei suoi ambiti di costruzione storica: il felicissimo rapporto fra fisica e matematica.

Lo scopo di una analisi fondazionale non è certo, oggi, quello dei padri fondatori che cercavano certezze in periodi di grandi crisi dei fondamenti, in particolare di crollo dello spazio-tempo assoluto euclideo, uno scopo quindi fortemente giustificato cento anni fa (i filosofi logicisti ancora in giro rivelano piuttosto tratti psicotici nella loro ricerca delle «cetrezze incrollabili») e, poi, altrettanto giustamente messo in questione da tanti, compreso il secondo Wittgenstein. L'obiettivo è piuttosto quello di praticare un'«etica» della conoscenza, per andare avanti: il dovere di ogni ricercatore di esplicitare i grandi *principi organizzatori* del proprio sapere, di rifletterci criticamente, per fare meglio, soprattutto nel rivolgersi ad altri ambiti scientifici, dove possono essere insufficienti per capire o venir messi in discussione, anche radicalmente, come è accaduto sia in Relatività sia in Meccanica Quantistica. Questo è il senso dell'universalità dinamica propria del sapere scientifico, ben diversa da ogni forma di assoluto.

In particolare, bisogna fare attenzione a queste immagini straordinarie che propone la macchina a stati discreti: sono ricche di conoscenza, ma danno un'immagine del mondo profondamente ancorato ai principi della rappresentazione/riduzione alfabetica ed ancor più all'atomismo, al dualismo e all'iterabilità, oggi insufficienti a capire i processi fisici ed ancor meno quelli del vivente. Tuttavia la scienza contemporanea, con la sua ricchezza e forza, non potrebbe esistere senza la simulazione digitale e, in generale, senza l'apporto dell'Informatica: per questo bisogna sviluppare un'analisi scientifica di ciò che essa ci dice, esattamente, lasciando da parte, come furon rapidamente dimenticati i pupazzi meccanici di Vaucanson, miti di un Universo computazionale, cervelli-calcolatori digitali, «programmi» genetici ed altre proiezioni sui fenomeni dell'ultima tecnologia disponibile, lettura del mondo sempre più ridicola e meccanica con il suo iterarsi nei secoli.

Note

[*] Testo della *Lezione Galileana* tenuta a Pisa il 25 ottobre 2006, per Pianeta Galileo. L'autore desidera ringraziare i promotori di questi incontri, un'occasione di scambio e di cultura, uno sforzo organizzativo notevole per promuovere la diffusione della scienza *in fieri*.

[**] cfr. http://www.di.ens.fr/users/longo.

[1] Si veda l'articolo di Cappuccio nel volume *Géométrie et Cognition* - le relative indicazioni bibliografiche sono reperibili sulla mia pagina web.

[2] La nozione di caos deterministico è matematicamente molto solida e ha… 110 anni (Poincaré), anche se le definizioni moderne datano dagli anni '60-'70. Esse si riassumono così: un sistema fisico deterministico (ovvero che consideriamo determinato o determinabile da un numero finito di equazioni, come un doppio pendolo, il sistema planetario, una moneta lanciata in un campo gravitazionale su una superficie matematicamente descrivibile…) è caotico quando è «topologicamente transitivo» (esistono orbite dense – ovvero che vanno ovunque consentito dai vincoli), ha un «insieme denso di punti periodici» ed è «sensibile alle condizioni iniziali», proprietà che possono essere descritte con rigore matematico (per inciso, tutti e tre i sistemi di cui sopra sono tali: anche il sistema solare, assicurano risultati recenti - si vedano i riferimenti più sotto). Dal punto di vista delle imagini, l'attrattore di un sistema non lineare anche in una dimensione (una equazione, come $x_{n+1} = 4\, x_n(1- x_n)$), evoca proprio quel che anche Platone chiamerebbe «caos» (sovrapporsi di linee o punti, ascillazioni «assurde»…). Non è quindi un ossimoro, malgrado molta volgarizzazione estremamente… volgare, bensì matematica solidissima. Grande strumento di intelligibilità, fa capire l'aleatorio classico (da distinguere da quello quantistico, si veda [2]), come determinazione che *non implica* la predittibilità (né l'iterabilità: un processo classico è aleatorio quando, iterato *nelle stesse condizioni iniziali*, non segue la stessa «traiettoria»); è la grande svolta rispetto alla congettura di Laplace, per il quale «la determinazione implica la predittibilità».

[3] Un'eccellente implementazione è in http://www.mathstat.dal.ca/~selinger/lagrange1/doublependulum.html .

[4] Scaricabili dalla mia pagina web.

[5] In [1] si evidenzia il ruolo delle simmetrie e loro rotture nell'analisi della causalità fisica.

[6] Si veda [5] per riferimenti ed ulteriori riflessioni.

[7] Si veda la nota 4.

[8] Si veda la nota 4.

[9] Si veda il libro di Pour-El e Richards, citato in [3].

BIBLIOGRAFIA

[1] Bailly F., Longo G., *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*. Hermann, Parigi 2006 (l'introduzione e l'indice, in inglese e francese, sono scaricabili da http://www.di.ens.fr/users/longo, al pari di altri testi menzionati).

[2] Bailly F., Longo G., Randomness and determination in the interplay between the continuum and the discrete, di prossima pubblicazione sulla rivista *Mathematical Structures in Computer Science*, 2007.

[3] Hoyrup M., Kolcak A., Longo G. Computability and the morphological complexity of some dynamics on continuous domains, di prossima pubblicazione sulla rivista *Theoretical Computer Science***,** 2007.

[4] Longo G., Computer modelling and natural phenomena, *European Software Engineering Conference and ACM SIGSOFT Symposium*, September 1-5, Helsinki, 2003.

[5] Longo G., Laplace, Turing and the 'imitation game' impossible geometry: randomness, determinism and programs in Turing's test, in *The Turing Test Sourcebook,* a cura di R. Epstein, G. Roberts e G. Beber, Kluwer, Dordrecht 2007. (versione francese su *Intellectica*, 35/2, 2002b, scaricabile dal sito su indicato).

[6] Longo G., Tendero P.-E., L'alphabet, la Machine et l'ADN: l'incomplétude causale de la théorie de la programmation en biologie moléculaire, Atti del convegno su *Logique, informatique et biologie*, Nizza, 2005, di prossima pubblicazione presso De Boeck, Parigi 2007 (e, in italiano, su *Naturalmente*; una versione inglese, più breve, è pure scaricabile da sito su indicato).

Prospezioni



Anche Galileo può errare

Andrea Frova

Dipartimento di Fisica, Università di Roma «La Sapienza»

1. Errori strategici

Nella sua vita, l'uomo Galileo di errori ne commise molti, più grande di tutti quello di essersi inimicato molti ecclesiastici,[1] e ancor più di aver sopravvalutato l'intelligenza e/o la statura morale della Chiesa. Galileo ritenne con grande ingenuità che, in fatto di moti del sistema Terra-Sole, essa si sarebbe lasciata persuadere dalla forza degli argomenti che egli era in grado di produrre. Se non altro per prudenza, onde non correre il rischio di vedersi presto clamorosamente smentita, con ripercussioni sulla sua credibilità (ma questo, a onor del vero, non sembra essere mai stato un elemento condizionante nelle pronunce della Chiesa, lo abbiamo anche oggi sotto gli occhi).

Galileo enunciò molto chiaramente questo principio di cautela nelle celebri «lettere copernicane» indirizzate a padre Benedetto Castelli e alla graduchessa Cristina di Lorena.[2] La sua fiducia e onestà intellettuale di scienziato furono puntualmente tradite, e lo sarebbero ancora oggi; basta pensare che la Commissione istituita da Giovanni Paolo II per la cosiddetta riabilitazione del Nostro – nata all'insegna di «… mai più un caso come quello di Galileo» – ha concluso che «la Chiesa si comportò in modo scientificamente più corretto dello stesso Galileo»; o anche ricordare che una quindicina di anni fa Joseph Ratzinger ha affermato pubblicamente che «la condanna di Galileo fu ragionevole e giusta». Ma non è di questo genere di errori, ben noti al vasto pubblico e pagati cari dell'interessato, che qui si vuole discutere, bensì di quelli, assai più rari e in certo senso preziosi, in cui egli incorse operando sul suo stesso terreno professionale.

2. Errori scientifici

Anche lo scienziato Galileo, pur nella sua grandiosa produzione scientifica, che a buon diritto lo fa definire in tutto il mondo «l'inventore della scienza», non fu esente da pecche, talvolta elementari, talvolta curiosamente in contraddizione con le sue stesse scoperte e invenzioni, talvolta proprio là dove più aveva diretto le sue potenti capacità di investigatore, vale a dire in merito alla mobilità della Terra e ai principi di inerzia e di relatività. O forse proprio per questo: da una parte, erano argomenti sui quali egli si sentiva così sicuro da esporli senza una doppia riflessione; dall'altra erano temi che gli stavano talmente a cuore da spingerlo su posizioni emotive dove la sua splendida mente, *una tantum*, poteva venire offuscata. Ma si tratta di evenienze così sporadiche da apparire soltanto eccezioni alla regola, atte quasi a evidenziare il suo abituale impeccabile rigore, così come una dissonanza dà risalto all'armonia dei suoni o il chiaroscuro al fulgore

della luce. E si tratta di errori benedetti per i comuni mortali, testimonianza di come persino gli eccelsi possano sbagliare, persino nel loro settore di competenza.

Gli errori, nella sua opera enciclopedica, vanno quindi cercati come gemme di gran pregio. Ve ne sono di più e di meno noti. Ad esempio, l'errata teoria delle maree – peraltro sotto certi aspetti geniale – è il suo abbaglio più conosciuto. In quel caso, Galileo decise di ignorare nozioni che pure erano diffuse sin dall'antichità, e precisamente il fatto che l'attrazione della Luna e del Sole sulle masse acquee gioca un ruolo cruciale. Da Aristotele in poi nessuno avrebbe negato tale ovvia constatazione. Già Dante, secoli prima, aveva scritto: *«E come 'l volger del ciel de la luna cuopre e discuopre i liti sanza posa…»*. È davvero stupefacente come il sacro fuoco che spingeva Galileo a cercare una prova sperimentale dei moti della Terra – rotazione sul proprio asse e rivoluzione attorno al Sole – possa avergli fatto commettere deliberatamente un simile fallo.

Un altro aspetto poco limpido è che Galileo si riferisce ai due moti circolari a velocità costante come a moti «equabili e uniformi» – laddove si tratta di moti uniformemente accelerati – pretendendo poi che una combinazione dei due dia luogo a un moto «disuniforme». Più che un concetto di inerzia circolare, come qualche storico ha suggerito, ciò indica l'assenza in lui della nozione di velocità come vettore, per cui si ha accelerazione anche quando il moto si limita a cambiare direzione.

Sulla stessa problematica si innesta l'errata interpretazione degli alisei, i quali sono sì prova della rotazione terrestre, ma per tutt'altre motivazioni che non quelle avanzate dal Nostro. In confronto alle maree, si tratta qui di un abbaglio di modesta entità, dato che gli effetti della forza di Coriolis - quella forza fittizia che si manifesta sui corpi in movimento in un sistema non inerziale - erano a quei tempi del tutto inimmaginabili (benché, vedremo, Galileo avesse sottocchio un altro effetto - oltre agli alisei - che parlava chiaro in merito ai caratteristici fenomeni che si svolgono di un sistema rotante).

Se una certa confusione in fatto di una possibile inerzia circolare non era a quell'epoca un peccato capitale, nella descrizione che Galileo fa della tecnica di puntamento dei cacciatori agli uccelli in volo ci si imbatte invece in un diretto e inequivocabile errore di applicazione del principio di inerzia. Qui Galileo si dà letteralmente la zappa sui piedi, peraltro senza alcuna attenuante, visto che l'argomento è indubitabilmente uno di quelli su cui più a lungo si è soffermato. Il brano è contenuto all'interno di un esauriente dialogo relativo ai principi di inerzia e relatività, ed è condito da tanti validissimi esempi - come la pietra in caduta dall'albero della nave o la freccia lanciata da una carrozza in corsa - per cui può accadere che passi inosservato.

Illustrerò i suddetti tre problemi, più quello relativo alla «forza del vuoto», lasciando da parte altri argomenti sui quali Galileo ha combinato pasticci, e cioè la teoria delle comete, dove l'aspra polemica con il padre Orazio Grassi, gesuita e suo grande nemico, gli fa sostenere tesi alquanto bizzarre, in particolare che le comete sarebbero effetti ottici dovuti ai riflessi della luce solare sui vapori che circondano la Terra, quindi a noi molto vicini. E poi le idee un po' ballerine sull'infinito e sugli infinitesimi, dove il suo volere la natura matematizzata a tutti i costi (insieme al timore di accuse di atomismo

e con esso di eresia eucaristica[3]) lo induce a tracciare una stretta corrispondenza tra segmenti geometrici/punti e materia aggregata/particelle costituenti. E anche alcune congetture assai curiose riguardanti le forze, ad esempio che tra le molecole dell'acqua non si eserciti forza alcuna in quanto essa è facilissimamente penetrabile.

3. Teoria delle maree: geniale ma errata

Cominciamo con il leggere un passo galileiano. Nel *Dialogo* egli fa dire a Salviati:[4]

> Parleremo prima del periodo diurno, come quello che è il principale… Ora, ripigliando il nostro ragionamento, replico e raffermo, esser sin ora ignoto come possa essere che l'acque contenute dentro al nostro seno Mediterraneo facciano quei movimenti che far se gli veggono, tuttavoltaché l'istesso seno e vaso contenente resti immobile…
>
> Due sorte di movimenti posson conferirsi ad un vaso, per li quali l'acqua, che in esso fusse contenuta, acquistasse facultà di scorrere in esso… Il primo sarebbe quando or l'una or l'altra di esse estremità si abbassasse… L'altra sorta di movimento è quando il vaso si muovesse… di moto progressivo, non uniforme, ma che cangiasse velocità, con accelerarsi talvolta ed altra volta ritardarsi… i quali effetti possiamo più apertamente dichiarare e manifestare al senso con l'esempio di una di queste barche le quali continuamente vengono da Lizzafusina, piene d'acqua dolce per uso della città.
>
> Figuriamoci dunque una tal barca venirsene con mediocre velocità per la Laguna, portando placidamente l'acqua della quale ella sia piena, ma che poi, o per dare in secco o per altro impedimento che le sia opposto, venga notabilmente ritardata; non perciò l'acqua contenuta perderà, al pari della barca, l'impeto già concepito, ma, conservandoselo, scorrerà avanti verso la prua, dove notabilmente si alzerà, abbassandosi dalla poppa…
>
> Sèguita ora che dimostriamo, come ed in qual maniera sia vero che il Mediterraneo e tutti gli altri seni, ed in somma tutte le parti della Terra, si muovano di moto notabilmente difforme, benché movimento nessuno che regolare ed uniforme non sia, venga a tutto l'istesso globo assegnato…
>
> Due aviamo detto essere i moti attribuiti al globo terrestre… Dalla composizione di questi due movimenti, ciascheduno per se stesso uniforme, dico resultare un moto difforme nelle parti della Terra: il che, acciò più facilmente s'intenda, dichiarerò facendone la figura.

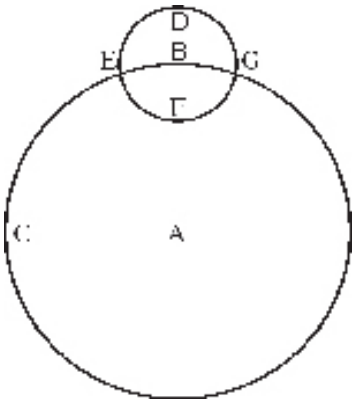


Figura 1.

> Concludiamo per tanto, che sì come è vero che il moto di tutto il globo e di ciascuna delle sue parti sarebbe equabile ed uniforme quando elle si movessero d'un moto solo, o fusse il semplice annuo o fusse il solo diurno, così è necessario che, mescolandosi tali due moti insieme, ne risultino per le parti di esso globo movimenti difformi, ora accelerati ed ora ritardati…

L'esempio della barca di Lizzafusina mostra come a Galileo sia assolutamente chiaro che i corpi situati in sistemi accelerati sono soggetti a forze (quelle che oggi chiamiamo «forze fittizie»). Di più, egli si rende anche conto che un «flusso e reflusso delle acque» può solo aversi se l'accelerazione varia periodicamente nel tempo (questo è ciò che egli intende quando parla di «moto difforme»). Egli però commette i seguenti errori: 1. di ritenere che il moto circolare sia un moto uniforme, contraddicendo al suo stesso principio di inerzia; 2. che dalla combinazione di due moti uniformi se ne origini uno accelerato, contraddicendo al suo stesso principio di relatività. Collisione diretta, dunque, con le colonne portanti della scienza galileiana.

Nel pensare al moto combinato di rotazione e rivoluzione della Terra attorno al Sole, è lecito supporre che Galileo avesse presente il comportamento di un certo tipo di giostra complessa dove i sedili dei passeggeri ruotano attorno a un fulcro che a sua volta ruota su un raggio più grande grazie a una piattaforma girevole (si veda la figura 2). Se allora Galileo non era in grado di calcolarsi i parametri del moto e l'eventuale effetto di marea in un sistema del genere, oggi anche uno studente di liceo può farlo per lui. Evitando la derivazione, vediamo a quali risultati si perverrebbe.

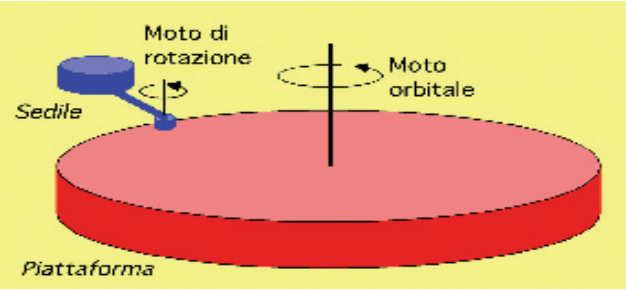


Figura 2 - La giostra complessa che simula il comportamento del sistema Terra-Sole.

Il moto del sedile del passeggero come risulta dal doppio moto circolare uniforme, per valori fissati dei periodi di rotazione T1 e orbitale T2, e dei rispettivi raggi R1 e R2, è una cicloide rappresentata in figura 3,

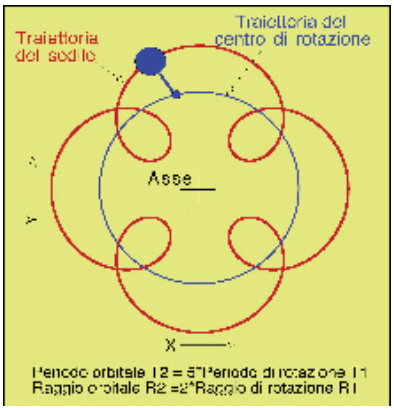


Figura 3 - Traiettoria cicloidale del sedile della giostra complessa, calcolata per valori dei raggi e dei periodi di rotazione che stanno nei rapporti mostrati.

e il risultante andamento dell'accelerazione nel tempo è illustrato in figura 4. Si vede che, come intuito da Galileo, l'accelerazione varia periodicamente nel tempo tra massimi e minimi. Se i due periodi individuali sono molto diversi, il periodo di tali oscillazioni è molto vicino al più piccolo dei due.

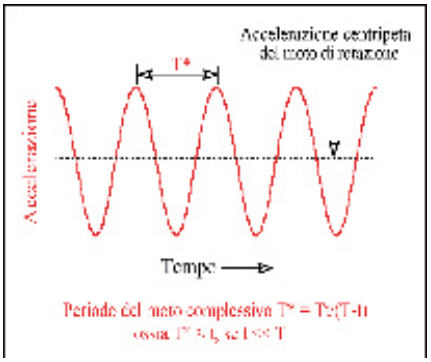


Figura 4 - Oscillazioni periodiche nell'accelerazione del sedile attorno al valore che compete al solo moto di rotazione del sedile.

Trasferiamo adesso il discorso al sistema Terra-Sole, considerando le due rotazioni in successione. Quanto a quella della Terra sul proprio asse, essa è $\omega = 7{,}27\text{x}10^{-5}$ rad/s, e il suo raggio r varia tra zero (poli) e 6.360 km (equatore). L'accelerazione centripeta $-\omega^2 r$ di tale moto si oppone a quella di gravità $g = 9{,}81$ m/s^2, riducendola di fatto al valore «efficace» $g' = g-\omega^2 r$. La corrispondente forza centrifuga causa un alleggerimento di tutti i corpi, nullo ai poli e massimo all'equatore. Qui si calcola $\omega^2 r = 3{,}42\cdot10^{-3}\cdot g$ e quindi si ha un'accelerazione di gravità efficace che vale $0{,}9966\cdot g$. Per quanto riguarda le acque, questo effetto produce una condizione di stabile rigonfiamento degli oceani presso l'equatore, o se preferiamo di schiacciamento ai poli, senza variazioni nel tempo.

Aggiungiamo adesso il termine di accelerazione centripeta derivante dal moto

orbitale (la cui velocità angolare è Ω = 0,020x10^{-5} rad/s e il raggio R=150 milioni di km), che è circa eguale per tutti i punti della Terra. Si calcola $\Omega^2 R$=0,60·10^{-3}·g, valore che va sommato alla precedente accelerazione alla mezzanotte e sottratto a mezzogiorno, come illustra la figura 5. All'equatore l'accelerazione di gravità efficace è allora

$$g' = g - \omega^2 r - \Omega^2 R = 0{,}9972 \cdot g \text{ a mezzogiorno}$$

$$g' \quad g - \omega^2 r - \Omega^2 R \quad 0{,}9960 \cdot g \text{ a mezzanotte}$$

con un'escursione $\Delta g/g$ pari allo 0,12% (ossia il peso di una massa di 1 grammo d'acqua varia di 1,2 mg-peso). Mentre la Terra gira, le acque continuano allora a fluire dall'emisfero illuminato della Terra, dove pesano di più, verso quello buio, dove pesano meno, ma l'effetto di marea così calcolato soffre di parecchi inconvenienti.

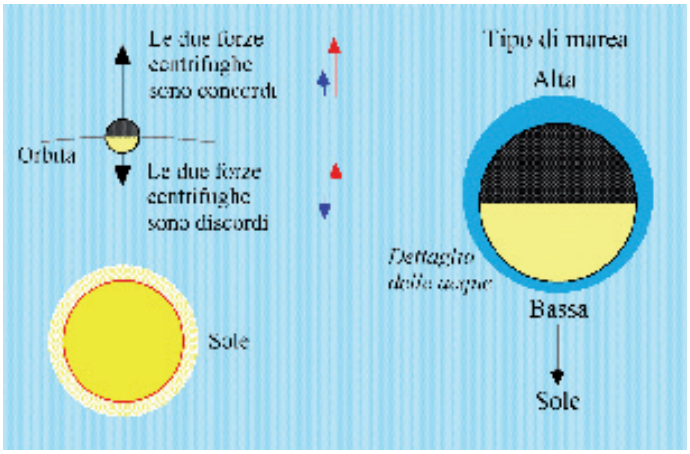


Figura 5 - L'effetto di marea calcolato secondo il modello proposto da Galileo presenta un solo massimo nelle 24 ore, e sempre di notte.

Primo, il ciclo avviene con un periodo dei massimi, sempre notturno, di 24 ore e 4 minuti, contro l'osservazione sperimentale, ben nota già a Galileo, di 12 ore e 25 minuti. Che il periodo così calcolato dovesse rivelarsi molto vicino a quello del giorno terrestre era qualitativamente prevedibile anche senza fare i conti e c'è veramente da chiedersi come Galileo, per solito così attento anche alle minime marcature dei fenomeni osservati, si sia fatto sfuggire questa così vistosa circostanza.

Secondo, l'escursione di marea che ne risulta è gigantesca, qualcosa dell'ordine di chilometri, contro il massimo mondiale di 16 m, osservato nella Baia di Fundy in Canada. Questo aspetto, però, era fuori dalla portata di Galileo, che se non era nella posizione di calcolarsi le accelerazioni, tanto meno poteva stimare le forze di marea e l'entità degli effetti conseguenti (ci vorrà parecchio tempo perché si arrivi a calcolare le reali accelerazioni in gioco, che corrispondono a valori assai più piccoli di quelli qui calcolati).

Terzo, non v'è alcun modo di prevedere le variazioni periodiche nelle escursioni di marea, per cui i massimi e i minimi si ripresentano nel tempo con valori diversi,

circostanza che a Galileo era ben nota. Strana negligenza, spiegabile solo con l'estrema foga di un uomo alla disperata ricerca di qualcosa che dimostri concretamente i moti della Terra, quasi fosse la prova determinante della sua innocenza.

L'inclusione delle forze gravitazionali esercitate da Sole e Luna sulle masse oceaniche, oltre alle accelerazioni che competono ai moti relativi nel sistema a due corpi Terra-Luna, risolve d'un colpo tutte le difficoltà. Il centro della Terra ha come traiettoria il luogo dei punti dove tutte le forze, reali e fittizie, si annullano, quindi alla sua superficie conta soltanto la differenza tra forze gravitazionali e forze centrifughe. Essa non è zero per via della loro diversa dipendenza dalla distanza tra i corpi, ma ovviamente è molto piccola. Nei punti sottostanti la Luna domina la forza gravitazionale (o se vogliamo prevale l'accelerazione gravitazionale), nei punti agli antipodi domina la forza centrifuga (o se vogliamo prevale l'accelerazione centripeta), come schematizzato in figura 6. In entrambi i casi si realizzano simultaneamente le condizioni per un massimo di marea, il cui periodo è di 12 ore e 25 minuti giacché, mentre la Terra fa mezzo giro su se stessa, la Luna si sposta di un po' nello stesso verso.

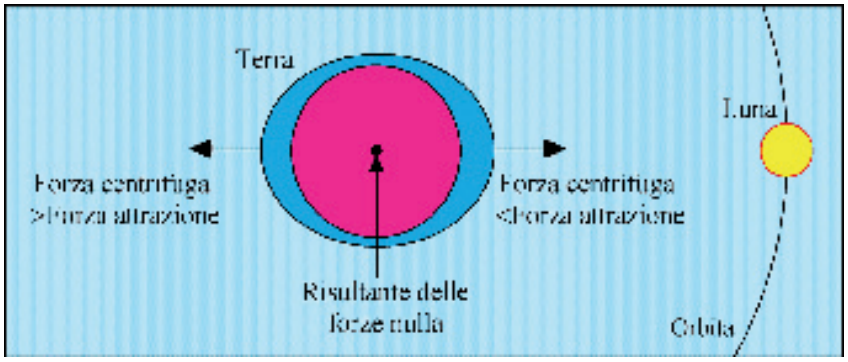


Figura 6 - Nel meccanismo corretto di produzione della marea contano soltanto le differenze tra forze reali e forze fittizie (ovvero tra le rispettive accelerazioni) e ciò riduce circa alla metà l'intervallo di tempo tra due massimi.

Evitando di fare i conti, peraltro molto semplici, nel passare da una condizione di minimo a una di massimo si trova una variazione relativa per l'accelerazione «efficace» pari a

$$\Delta g/g = 1{,}1 \cdot 10^{-7} \quad \text{per il contributo della Luna}$$

$$\Delta g/g = 0{,}51 \cdot 10^{-7} \quad \text{per quello del Sole}$$

quindi ben quattro ordini di grandezza inferiori a quella stimata in base al modello di Galileo. La Luna è quindi la principale responsabile dell'effetto, mentre al Sole spettano le variazioni nell'escursione di marea (massima escursione se i due astri sono in congiunzione o opposizione, marea delle *sizigie*, minima se con la Terra formano un angolo retto, marea delle *quadrature*).

Un particolare curioso: Galileo era così incredibilmente convinto della bontà del

suo modello, da voler dare al libro, che pure copriva un'enorme varietà di temi, il titolo *Flusso e reflusso del mare*, anziché quello definitivo di *Dialogo sopra i due massimi sistemi*. Fu papa Urbano VIII a opporsi minacciando di non concedere l'*imprimatur*, una volta tanto venendo involontariamente in aiuto dello scienziato.

Questo terzo svarione di Galileo, ossia il non tener conto degli effetti della gravitazione, fu in parte motivato dalla sua innata (e salutare) diffidenza verso tutto quel bagaglio di antiche superstizioni che attribuivano agli astri un ruolo determinante sulla vita degli uomini e sulla natura. Galileo non crede ai miracoli, non crede ai sortilegi e alle magie, tanto da negare aprioristicamente qualsiasi fenomeno che appaia scarsamente tangibile e implausibile nell'ambito delle leggi di natura conosciute. Lo professa in varie occasioni, una per tutte quella in cui, nel *Dialogo*, mette in bocca (imprudentemente) a Salviati, in risposta all'idea di Simplicio che la velocità nel moto accelerato aumenti per salti:

> Io non ho detto, né ardirei dire, che alla natura e a Dio fusse impossibile il conferir quella velocità, che voi dite, immediatamente; ma dirò bene che de facto la natura non lo fa; talché il farlo verrebbe ad esser operazione fuora del corso naturale, e però miracolosa.

4. I venti alisei

Per gli aristotelici una delle prove dell'immobilità della Terra era l'assenza di vento. Ignorando il principio di conservazione del momento angolare per cui l'atmosfera, non essendo soggetta a forze esterne, deve muoversi solidalmente con il globo condensato da cui ha tratto origine, Galileo si trova in grande difficoltà. Tuttavia, avendo appena formulato il principio di inerzia, egli non dovrebbe accettare facilmente l'idea che un sistema isolato, libero da azioni esterne, possa avere dei comportamenti così differenziati nelle sue parti (forse qui pretendo troppo, al tempo di Galileo a nessuno veniva in mente di interrogarsi sulla nascita dei pianeti).

Invece, avendo avuto notizia dell'esistenza degli alisei, venti costanti che spirano sulle distese oceaniche, anziché andare alla ricerca di un principio generale che giustificasse il trascinamento dell'atmosfera, carica su di essi tutto il peso della questione. I venti sarebbero assenti laddove la Terra presenta delle asperità, quali i rilievi montuosi, che avrebbero l'effetto di bloccare il flusso dell'aria, ma si manifesterebbero sulle grandi distese d'acqua. Nelle parole di Galileo:

> dove la superficie del globo avesse grandi spazii piani […] cesserebbe in parte la causa per la quale l'aria ambiente dovesse totalmente obbedire al rapimento della conversion terrestre.

Particolare significativo: i naviganti riportavano che la velocità degli alisei era poco più di una decina di chilometri all'ora, mentre fin dall'antichità si sapeva che la velocità di movimento dei punti alla superficie terrestre era circa cento volte maggiore (Galileo dice esplicitamente «nel cerchio massimo del globo è poco meno di mille miglia per ora»[5]). Molto più grande ancora è la velocità che competerebbe ai presunti venti

associati al moto della Terra lungo l'orbita solare[6]. Discrepanza ben dura da mandar giù. Su questo punto è indubbio che Galileo sorvola con eccessiva leggerezza, trascinato dalla sua foga dimostrativa.

Ed ecco un grazioso passo del *Dialogo* che illustra una delle conseguenze del «rapimento» dell'atmosfera ad opera delle asperità del suolo:[7]

> SAGREDO: «Ma questi uccelli, che ad arbitrio loro volano innanzi e 'ndietro e rigirano in mille modi, e, quel che importa più, stanno le ore intere sospesi per aria, questi, dico, mi scompigliano la fantasia, né so intendere come tra tante girandole e' non ismarriscano il moto della Terra, o come e' possin tener dietro a una tanta velocità…».
>
> SALVIATI: «Quando gli uccelli avessero a tener dietro al corso de gli alberi con l'aiuto delle loro ali, starebbero freschi; e quando e' venisser privati dell'universal conversione, resterebbero tanto indietro, e tanto furioso apparirebbe il corso loro verso ponente, a chi però gli potesse vedere, che supererebbe di assai quel d'una freccia… Ma la verità è che il moto proprio de gli uccelli, dico del lor volare, non ha che far nulla co 'l moto universale, al quale né apporta aiuto né disaiuto: e quello che mantiene inalterato cotal moto ne gli uccelli, è l'aria stessa per la quale e' vanno vagando, la quale, seguitando naturalmente la vertigine della Terra, sì come conduce seco le nugole, così porta gli uccelli ed ogn'altra cosa che in essa si ritrovasse pendente: talché, quanto al seguir la Terra, gli uccelli non v'hanno a pensare, e per questo servizio potrebbero dormir sempre».[8]

Nella prima metà dell'Ottocento, l'ingegner Coriolis ci spiega come i corpi in movimento su sistemi non inerziali, qual è la Terra, siano soggetti alla forza che porta il suo nome. Come conseguenza della rotazione terrestre, il flusso d'aria che costantemente soffia dal Polo all'equatore, piega verso Ovest e questa è la vera origine degli alisei. Merita sottolineare che il verso è lo stesso che avrebbero nella spiegazione galileiana, ma il meccanismo fisico, tutto diverso, porta a un valore appropriato della velocità del vento; i controalisei, che si manifestano in alta quota, soffiano in senso contrario, un aspetto che ovviamente non è spiegabile nell'ambito dell'ipotesi galileiana.

5. Colpire bersagli in volo

Con questo esempio Galileo - forse fuorviato da uno sprovveduto cacciatore - demolisce in brevi parole una delle sue glorie, il principio d'inerzia. Leggiamo, sempre dal *Dialogo*, il suo suggerimento di come si debba puntare e tirare agli uccelli in volo:

> Ed ora […] vengo a intender la ragione di un problema venatorio di questi imberciatori che con l'archibuso ammazzano gli uccelli per aria: e perché io mi era immaginato che per còrre l'uccello fermassero la mira lontana dall'uccello, anticipando per certo spazio, e più o meno secondo la velocità del volo e la lontananza dell'uccello, acciò che sparando ed andando la palla a dirittura della mira venisse ad arrivar nell'istesso tempo al medesimo punto, essa co 'l suo moto e l'uccello co 'l suo volo, e così si incontrassero;[9] domandando ad uno di loro se la lor pratica fusse tale, mi rispose di no, ma che l'artifizio era assai più

> facile e sicuro, e che operano nello stesso modo per appunto che quando tirano all'uccello fermo, cioè che aggiustano la mira all'uccel volante, e quello co 'l muover l'archibuso vanno seguitando, mantenendogli sempre la mira addosso sin che sparano, e che così gli imberciano come gli altri fermi. Bisogna dunque che quel moto, benché lento, che l'archibuso fa nel volgersi, secondando con la mira il volo dell'uccello, si comunichi alla palla ancora… sì che la palla abbia dal fuoco il moto diritto in alto, e dalla canna il declinar secondando il volo dell'uccello… Il tener dunque la mira continuamente indirizzata verso lo scopo fa che il tiro va a ferir giusto…

Chiarezza vuole che si illustri con un piccolo schema il discorso errato di Galileo, e poi quello corretto (figura 7). Se si sparasse come suggerisce Galileo, tenendo il fucile sempre puntato sull'uccello e seguendone il volo, le prede se la caverebbero senza

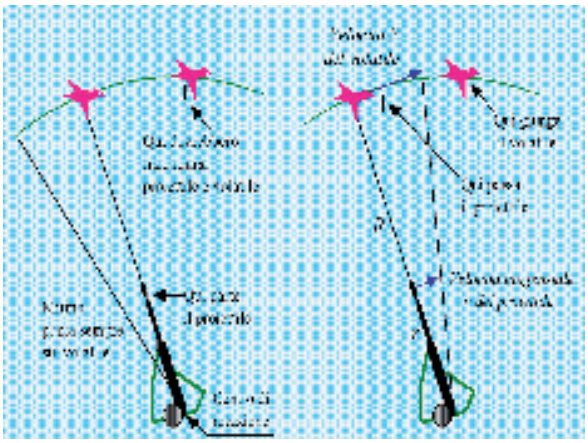


Fig. 7 - Puntamento del cacciatore: a sinistra la descrizione di Galileo, a destra quello che corrisponde a una corretta applicazione del principio d'inerzia.

danno, poiché si lascerebbero i proiettili alle spalle. Uscendo dalla canna, infatti, la velocità tangenziale v del proiettile deve conservarsi. Ma la velocità V del volatile è molto maggiore, essendo data da quella del proiettile moltiplicata per il rapporto dei raggi $R/r >> 1$, quindi proiettile passa parecchio *dietro* il volatile. Si tratta di un semplice esercizio di applicazione del principio di inerzia e Galileo vi inciampa come un principiante! Una bella consolazione per noi comuni mortali, e un monito a dubitare sempre anche delle nostre certezze più salde.

6. L'inesistente «forza del vuoto»

Un altro curioso qui-pro-quo in cui Galileo incorre è che sussista una «forza del vuoto», concetto di aristotelica memoria, forza che Galileo ritiene addirittura di misurare come la resistenza offerta all'estrazione di un pistone da un vaso cilindrico. Non si rende conto che invece sta determinando il valore della pressione atmosferica esterna, la cui esistenza avrebbe dovuto essergli conosciuta, visto che aveva di persona effettuato un esperimento per mostrare che l'aria ha un peso. L'idea della forza del vuoto nasce dall'osservazione che occorre fare uno sforzo per separare due lastre ben levigate. Se una viene sollevata rapidamente, l'altra la segue come se fosse incollata ad essa. Galileo

ripete un esperimento di Aristotele, nel quale si misurava la forza necessaria per estrarre uno stantuffo da un cilindro a tenuta.

Oggi l'esperimento può essere rapidamente eseguito con una siringa farmaceutica - come mostrato in figura 8 – appendendo un secchiello allo stantuffo e riempiendolo gradualmente di sabbia finché non comincia a scendere. Si trova un risultato molto vicino a quello noto per il peso della colonna atmosferica che insiste sulla sezione dello stantuffo (Galileo, con mezzi assai più laboriosi aveva misurato circa la metà). Sarà il suo allievo Torricelli, solo qualche anno più tardi, a capire la vera origine del fenomeno e allora il passo di lì all'invenzione del barometro sarà brevissimo.

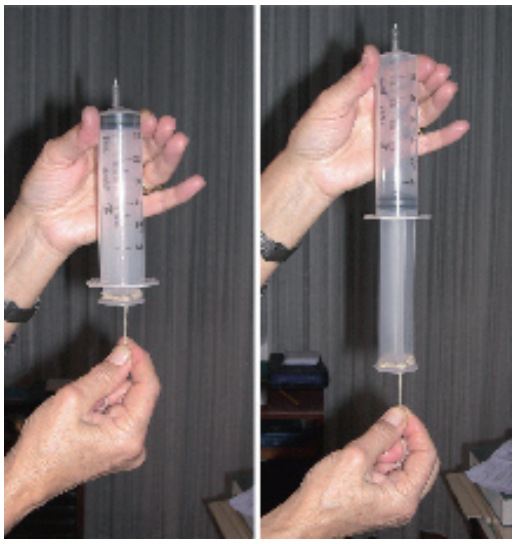


Figura 8 - Come misurare la pressione atmosferica dalla forza necessaria per estrarre lo stantuffo da una siringa chiusa alla sommità.

NOTE

[1] Il padre Grienberger del Collegio Romano dei Gesuiti così si espresse: «Se il Galileo si havesse saputo mantenere l'affetto dei Padri di questo Collegio, viverebbe glorioso al mondo e non sarebbe stato nulla delle sue disgrazie, e harebbe potuto scrivere ad arbitrio suo d'ogni materia, dico anco di moti della terra, etc.» (Lettera di Galileo del 1634 a Elia Diodati, Ed. Naz. XVI, p. 115).

[2] Se ne possono leggere ampi stralci ad esempio in bibliografia [1].

[3] Occorre dire che le concezioni atomistiche alla Democrito (che Galileo nel *Saggiatore* aveva mostrato di condividere), postulando che le varie sostanze fossero costituite da un unico tipo di particelle solo diversamente figurate e combinate, erano all'epoca considerate inconciliabili con la dottrina cattolica, in quanto avrebbero contraddetto il dogma della transustanziazione, appena stabilito nel Concilio di Trento. In effetti Galileo fu denunciato presso il Sant'Uffizio - da un anonimo facilmente individuabile nel gesuita Orazio Grassi - per eresia eucaristica [2].

[4] *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Giornata quarta, Ed. Naz. VII, p. 442 e segg.

[5] Per l'esattezza 1660 km/h, come si calcola subito dal periodo di rotazione della Terra e dal suo raggio.

[6] Il suo valore è di 107.500 km/h.

[7] *Dialogo sopra i due massimi sistemi*, Ed. Naz. V.

[8] Lo stesso concetto, altrove, si trova espresso in maniera più greve: *«… è meraviglia che altri possa orinare, correndo noi così velocemente dietro all'orina; o almanco ci doveremmo orinare giù per le ginocchia»*. (Postilla di Galileo a *Contro il moto della Terra* di Lodovico delle Colombe, Ed. Naz. III, p. 255).

[9] Si noti che questo è proprio il meccanismo corretto!

BIBLIOGRAFIA

[1] A. Frova e M. Marenzana, *Parola di Galileo*, RCS-Libri, Superbur Saggi, Milano 1998 (si veda, in particolare, il Cap. 11).

[2] P. Redondi, *Galileo eretico*, Einaudi, Torino 1983.

Il Principio di similitudine in fisica

Roberto Casalbuoni

Dipartimento di Fisica dell'Università di Firenze
Sezione INFN di Firenze
Istituto Galileo Galilei di Fisica Teorica, Arcetri, Firenze

1. Introduzione

Il problema di cosa succeda cambiando le dimensioni degli oggetti o delle persone ha sempre affascinato l'uomo (vedi i Titani, Golia, i Lillipuziani, ecc.). Il problema è non banale perchè per capire cosa effettivamente succeda non è in genere sufficiente cambiare solo le dimensioni geometriche. Il primo ad affrontare questo problema nel modo corretto è stato Galileo Galilei nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* [3].

Il problema viene affrontato oggi con un metodo di analisi che va sotto il nome di Analisi Dimensionale o di Principio di Similitudine, in quanto si cerca di capire cosa accada passando da una data situazione ad una situazione similare. L'idea che si sfrutta è che in questo passaggio le relazioni tra grandezze fisiche rimangono invariate. Prima di discutere in dettaglio come si applichi questo principio è opportuno osservare che il Principio di similitudine è uno dei più potenti mezzi di indagine fisica con applicazioni in molti settori, per esempio:

- ricerca fondamentale: meccanica statistica (transizioni di fase, strutture cristalline); particelle elementari (gruppo di rinormalizzazione in teoria dei campi);
- teoria dei modelli (ingegneria): idrodinamica, aerodinamica, turbolenza (macchine del vento ecc.).

Il principo, come vedremo, è basato su idee molto semplici, che potrebbero essere bene introdotte anche a livello liceale.

Iniziamo il nostro percorso domandandosi cosa significhi similitudine. L'idea è molto semplice in matematica elementare: sono *simili* figure geometriche ottenute con una dilatazione comune di tutte le lunghezze. In questa trasformazione si conservano gli angoli. È possibile estendere questo concetto ad altre situazioni? Possiamo pensare di estendere il significato geometrico osservando che in geometria sono simili oggetti che hanno delle qualità in comune (per le figure piane gli angoli). Nel Medioevo ci si chiedeva quale fosse l'essenza di un oggetto, cioè cosa distingue per esempio un cavallo da un asino. Il concetto di essenza si esprimeva tramite la *quidditas*, ma la risposta

non era certo molto soddisfacente: si diceva, per esempio che un cavallo possedeva l'*equinitas* mentre un asino l'*asinitas*. Quindi i cavalli risultano simili tra loro ma non simili agli asini. Il problema connesso con la definizione delle qualità di un oggetto può diventare facilmente di natura semantica, in quanto può portare a formulare frasi prive di senso, se non si rispettano le qualità assegnate. Il tipico esempio:

$$3 \text{ mele} - 2 \text{ pere} = ? \tag{1.1}$$

Se invece dico

$$2 \text{ frutti} + 3 \text{ frutti} = 5 \text{ frutti} \tag{1.2}$$

la frase risulta corretta. Dunque per confrontare delle quantità occorre parlare di quantità omogenee, che siano cioè definite come appartenenti ad una classe definita di oggetti. Le grandezze fisiche si caratterizzano in termini della loro misura e questa fa riferimento alle unità scelte. Per confrontare delle grandezze fisiche (cioè, scrivere una legge fisica) occorre che tali grandezze siano della stessa specie o, come si dice, abbiano le stesse dimensioni. Accade che tutte le quantità misurabili, o tramite le leggi della fisica o tramite la loro definizione, siano riportabili a misure di lunghezze, tempi e masse.

Che siano tre le dimensioni fondamentali è un fatto di esperienza: nessuna teoria lo spiega. Dunque, se si ha una legge fisica del tipo A = B, A e B devono avere le stesse dimensioni, in termini delle dimensioni fondamentali, e devono essere misurate nelle stesse unità. In questo caso si mostra che la legge vale in un arbitrario sistema di unità. Su ciò si basa l'analisi dimensionale che è la versione quantitativa del principio di similitudine. L'uso dell'analisi dimensionale serve non solo per verificare che le equazioni che scriviamo sono corrette, ma ha anche un potere predittivo notevole: infatti l'invarianza sotto cambiamenti di unità di misura si può anche rileggere come una invarianza della legge rispetto a trasformazioni che riscalano in maniera fissata le grandezze che intervengono. Esempio: se vale la legge A = B con A e B lunghezze, vale anche sA = sB. Come vedremo, questa invarianza di scala, conseguente dal principio di similitudine (o di omogeneità) e formalizzata nell'analisi dimensionale, ha un grande potere predittivo. Per questo il principio sarebbe uno strumento prezioso anche nelle scuole medie superiori.

2. Similitudine in Geometria

Consideriamo un quadrilatero: il suo perimetro in funzione dei lati sarà dato da

$$P = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 \tag{2.1}$$

Questa espressione si può riscrivere nella forma

$$P = \ell_1 \left(1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} + \frac{\ell_3}{\ell_1} + \frac{\ell_4}{\ell_1} \right) = \ell_1 f\left(\frac{\ell_2}{\ell_1}, \frac{\ell_3}{\ell_1}, \frac{\ell_4}{\ell_1} \right) \tag{2.2}$$

L'ultima relazione può essere determinata usando l'analisi dimensionale, dato che primo e secondo membro devono avere le stesse dimensioni. Quindi il secondo membro si può scrivere come uno qualunque dei lati per una funzione *f* dipendente solo da quamtità adimensionali quali il rapporto degli altri lati con quello scelto, oppure degli angoli.

Vediamo, così, che sotto una trasformazione di scala

$$\ell_i \to s\ell_i \tag{2.3}$$

il perimetro scala in modo lineare:

$$P \to sP \tag{2.4}$$

Consideriamo ora il triangolo rettangolo in figura 1:

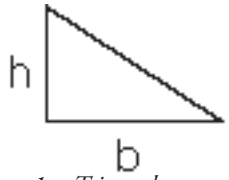


Figura 1 - Triangolo rettangolo.

La sua area è data da

$$S = \frac{hb}{2} = b^2\left(\frac{h}{2b}\right) = h^2\left(\frac{h}{2h}\right) \tag{2.5}$$

L'analisi dimensionale ci dice che, dovendo entrambi i membri avere le dimensioni di una lunghezza al quadrato, il secondo membro deve essere il quadrato di un lato per una funzione del rapporto adimensionale h/b:

$$S = b^2 f\left(\frac{h}{b}\right) \tag{2.6}$$

Analogamente se consideriamo il poligono piano di n lati in figura 2:

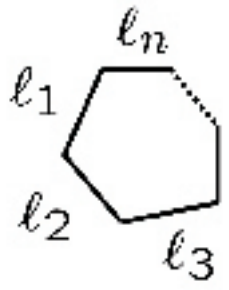


Figura 2 - Poligono di n lati considerato nel testo

avremo

$$S = \ell_1^2 f\left(\frac{\ell_2}{\ell_1}, \frac{\ell_3}{\ell_1}, \ldots, \frac{\ell_n}{\ell_1}\right) \tag{2.7}$$

e sotto la trasformazione di scala sui lati:

$$\ell_i \to s\ell_i \tag{2.8}$$

si avrà

$$S \to s^2 S \tag{2.9}$$

Consideriamo adesso un parallelepipedo

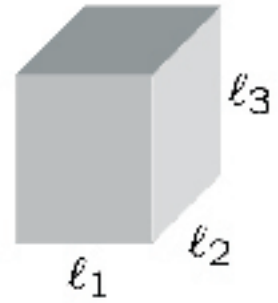


Figura 3 - Parallelepipedo.

Il suo volume è dato da

$$V = \ell_1 \ell_2 \ell_3 = \ell_1^3 \frac{\ell_2}{\ell_1}\frac{\ell_3}{\ell_1} = \ell_1^3 f\left(\frac{\ell_2}{\ell_1}, \frac{\ell_3}{\ell_1}\right) \tag{2.10}$$

Questa procedura si estende facilmente ad un solido generico. Il risultato è che se modifichiamo le lunghezze di tutti i lati di un fattore s, il volume del solido cambierà di un fattore pari al cubo di s:

$$\ell_i \to s\ell_i \qquad V \to s^3 V \tag{2.11}$$

Come applicazione di queste considerazioni si può dare una rapida dimostrazione del Teorema di Pitagora. Consideriamo il triangolo T:

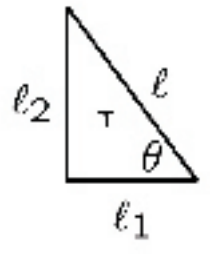


Figura 4 - Triangolo T.

Il triangolo è univocamente determinato dall'ipotenusa e dall'angolo θ (alternativamente potremmo pensarlo determinato dall'ipotenusa e da un cateto). Quindi, in base alle considerazioni precedenti, la sua area sarà della forma

$$S = \ell^2 f(\theta) \tag{2.12}$$

dato che l'angolo θ non cambia se riscaliamo tutti i lati del triangolo.

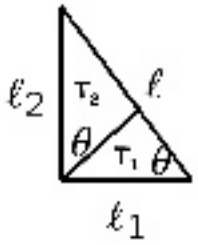


Figura 5 - La decomposizione del triangolo T nei due triangoli T_1 e T_2, entrambi simili a T.

Se costruiamo l'altezza relativa all'ipotenusa vediamo che i triangoli T_1, T_2 e T sono simili. Pertanto:

$$S_1 = \ell_1^2 f(\theta), \quad S_2 = \ell_2^2 f(\theta) \tag{2.13}$$

e poichè

$$S = S_1 + S_2 \tag{2.14}$$

segue:

$$\ell^2 f(\theta) = \ell_1^2 f(\theta) + \ell_2^2 f(\theta) \tag{2.15}$$

e semplificando si ottiene il teorema di Pitagora. Il risultato precedente vale solo se la somma degli angoli di un triangolo vale 180°. Infatti la similitudine dei tre triangoli si basa su questo assunto. Questo risultato è vero solo in uno spazio piatto ma non vale, per esempio, sulla sfera, dove le rette sono definite come cerchi di arco massimo (nell'esempio in figura la somma degli angoli del triangolo sferico è 270°).

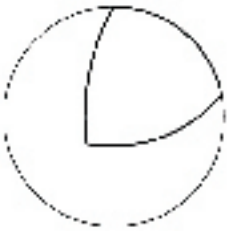


Figura 6 - Nel triangolo sferico mostrato in figura la somma degli angoli vale 270 °.

Questo è correlato con il 5° postulato di Euclide (per un punto passa una ed una sola parallela ad una retta data) che è il punto in cui le geometrie euclidee e quelle non euclidee differiscono. Infatti nelle geometrie non-euclidee il Teorema di Pitagora non vale (vedi Fig. 7).

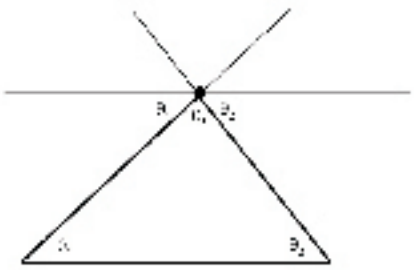


Figura 7 - Se vale il postulato di Euclide: «per un punto passa una ed una sola parallela ad una retta assegnata», allora la somma dei tre angoli di un triangolo vale 180 ^{0}.

3. Galileo e le trasformazioni di scala

Galileo Galilei ha fornito uno dei primi esempi di trasformazione di scala in un caso fisico. Il passo seguente è tratto dal *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* [3]:

> E per un breve esempio di questo che dico, disegnai già la figura di un osso allungato solamente tre volte, ed ingrossato in tal proporzione, che potesse nel suo animale grande far l'uffizio proporzionale a quel dell'osso minore nell'animal più piccolo, e le figure sono queste: dove vedete sproporzionata figura che diviene quella dell'osso ingrandito. Dal che è manifesto, che chi volesse mantener in un vastissimo gigante le proporzioni che hanno le membra di un uomo ordinario, bisognerebbe o trovar materia molto più dura e resistente per formarne l'ossa, o vero ammettere che la robustezza sua fusse a proporzione assai più fiacca che ne gli uomini di statura mediocre; altrimenti, crescendogli a smisurata altezza, si vedrebbono dal proprio peso opprimere e cadere. Dove che, all'incontro, si vede, nel diminuire i corpi non si diminuir con la medesima proporzione le forze, anzi ne i minimi crescer la gagliardia con proporzion maggiore: onde io credo che un piccolo cane porterebbe addosso due o tre cani eguali a sè, ma non penso già che un cavallo portasse nè anco un solo cavallo, a se stesso eguale.

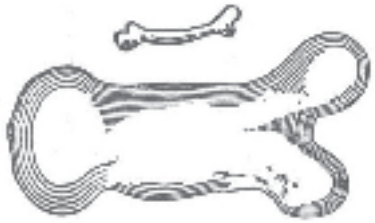


Figura 8 - Confronto delle ossa dal brano di Galileo [3].

In questo brano Galileo fa una considerazione sul cambiamento di scale in fisica. Il suo interesse si rivolge a cosa accada se, per esempio, si aumentano o si diminuiscono le dimensioni di un osso. La pressione che la forza peso esercita sulla sezione trasversale dell'osso è proporzionale a V/S e quindi la resistenza dell'osso a S/V.

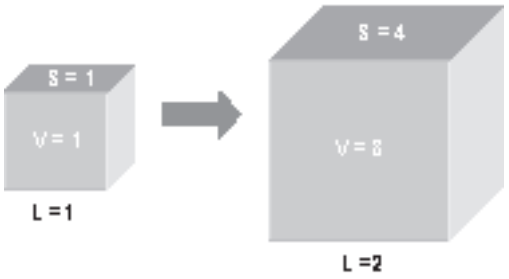


Figura 9 - Scalando le dimensioni lineari di un fattore 2 il valore della superficie di una faccia del cubo raddoppia, mentre il volume diventa 8 volte più grande. Quindi il rapporto tra volume e superficie raddoppia.

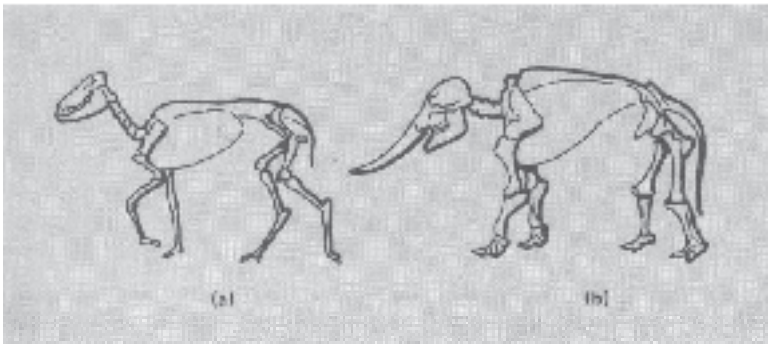


Figura 10 -. Due animali estinti, il Neohipparion (piccolo cavallo americano) a sinistra ed un Mastodonte a destra, un animale simile all' elefante, riportati in uguale scala. La figura illustra come le ossa di un animale più pesante siano più spesse e quindi più forti.

Vediamo che se scaliamo tutte le dimensioni di s la pressione (il segno ~ significa uguale a meno di fattori numerici):

$$P \sim \frac{V}{S} \qquad (3.1)$$

scala come s. Quindi, aumentando le dimensioni la pressione aumenta e le capacità di resistenza diminuiscono. Questo è esemplificato nella figura 10. In figura 11 si mostra invece un esempio errato di cambiamento di dimensioni.

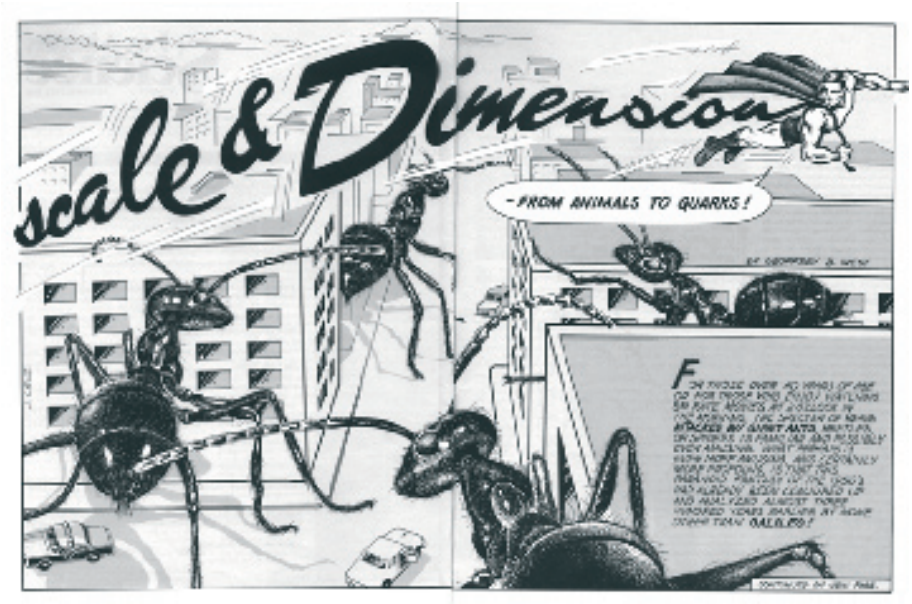


Figura 11 - La figura, ripresa da un albo di Superman di Siegel e Shuster, fa l'errore di rappresentare delle formiche giganti mantenendo inalterati i rapporti tra le varie dimensioni. Come risulta dall'argomento di Galileo, questa rappresentazione è errata.

Galileo usò un argomento di scala anche per quanto concerne il moto di caduta dei gravi, per capire la dipendenza del moto dalla resistenza dell'aria. Considerando oggetti sferici di materiale fissato il ragionamento di Galileo era che la resistenza dell'aria sulla sfera che cade è proporzionale alla superficie ed inversamente proporzionale al peso e quindi al volume. Perciò si deve avere:

$$R \sim \frac{S}{V} \sim \frac{1}{r} \qquad (3.2)$$

dove *r* è il raggio della sfera. In questo modo Galileo dimostrò che per eliminare l'effetto della resistenza dell'aria conviene usare sfere grandi.

Un altro esempio interessante riguarda il metabolismo e la sua dipendenza dal peso corporeo in condizioni di inattività fisica. Il metabolismo si misura dalla quantità di energia (calore) perduta, *B*. Ci aspettiamo che la perdita sia dovuta essenzialmente ad effetti di superficie quali la sudorazione, l'irradiazione ecc. Dato che la superficie scala come il quadrato delle dimensioni lineari, mentre il volume come il cubo, cioè $S \sim \ell^2$ e $V \sim \ell^3$, segue

$$B \sim S \sim V^{2/3} \sim P^{2/3} \qquad (3.3)$$

dove *P* è il peso corporeo (proporzionale al volume). In figura 12 questo risultato è paragonato con una serie di misure di metabolismo effettuate su vari animali. Come si vede la legge 2/3 è abbastanza ben seguita anche se la determinazione migliore effettuata sulle varie specie da come risultato 3/4 ~ 0.75 invece di 2/3 ~ 0.67, mostrando la presenza di effetti diversi da quelli puri di superficie.

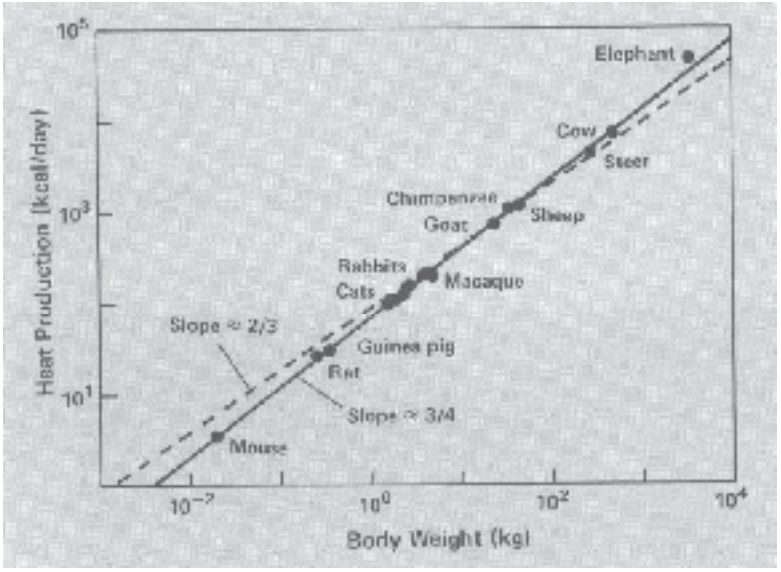


Figura 12 - Il metabolismo, B, in funzione del peso corporeo.

4. Analisi dimensionale

Le considerazioni precedenti si basano su quantità che dipendono da un solo fattore di scala geometrico (una lunghezza). Ma in fisica intervengono anche altre grandezze con dimensioni diverse. Come abbiamo già osservato, tutte le grandezze fisiche si possono riportare a misure di massa, di lunghezza e di tempo che indicheremo con i simboli m, ℓ e t. Infatti tutte le altre grandezze hanno dimensioni riconducibili alle tre precedenti, per esempio (facendo uso delle notazioni di Maxwell che definiscono le dimensioni della grandezza fisica – in parentesi quadra – in termini di potenze di m, ℓ e t):

$$[v] \quad \ell t^{-1}, \quad [a] \quad \ell t^{-2}, \quad [F] \quad m\ell t^{-2}, \quad [L] \quad [E] \quad m\ell^2 t^{-2} \tag{4.1}$$

dove v è la velocità, a l'accelerazione, F la forza, L il lavoro ed E l'energia. Il principio di similitudine si può formulare in modo preciso tramite la teoria dell'analisi dimensionale, da cui si possono in particolare ricavare tutti i risultati precedenti. Questa teoria fu formulata esplicitamente da Fourier [2]:

> Ogni quantità fisica ha una sua propria dimensione ed i vari termini di un'equazione non possono essere comparati se non hanno lo stesso esponente dimensionale.

Però l'analisi dimensionale fu usata per risolvere problemi fisici solo più tardi. Rayleigh nel 1915 osservava:

> Sono stato spesso impressionato dalla scarsa attenzione presentata dai ricercatori al principio di similitudine . Avviene spesso che risultati sono enunciati sotto forma di leggi nuove sulla base di esperimenti molto complessi, quando potrebbero essere ottenuti sulla base di semplici e rapide considerazioni dimensionali.

La formulazione più generale del principio di similitudine o dell'analisi dimensionale è dovuta a E. Buckingham [1], e dice:

In ogni problema fisico che coinvolge delle variabili dimensionate, la loro relazione si può esprimere costruendo tutte le possibili quantità adimensionali G, G_1, G_2,…,G_n. La soluzione è allora della forma:

$$G = f(G_1, G_2, \cdots, G_n) \tag{4.2}$$

ove *f* è una funzione di *n* variabili. Se c'è una sola quantità adimensionale allora

$$G = \text{costante} \tag{4.3}$$

Daremo di seguito una serie di risultati che si possono dedurre in questo modo senza bisogno di risolvere le equazioni fisiche che descrivono il fenomeno. In generale per ottenere dei risultati dal principio di similitudine o dall'analisi dimensionale, occorre seguire i seguenti passaggi:

- studio della fenomenologia,
- formulazione del problema,
- determinazione delle variabili da cui dipende il problema.

Consideriamo il semplice esempio della caduta di un grave:

- fenomenologia – tutti i gravi, nel vuoto, cadono con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro massa;
- formulazione del problema – ci chiediamo come varia il tempo di caduta di un grave (nel vuoto) in funzione dell'altezza da cui si lascia cadere;
- risposta dimensionale – richiede la determinazione delle quantità da cui dipende il tempo di caduta. In base all'analisi fenomenologica queste saranno: l'altezza *h*, e l'accelerazione *g* di gravità. Non dipenderà però dalla massa.

Dato che vogliamo esprimere il tempo come funzione di *h* e *g*, dovremo cercare una combinazione adimensionale di queste tre grandezze. Equivalentemente possiamo cercare una combinazione di *g* e *h* con le dimensioni di un tempo. Dovremo cioè richiedere:

$$[t] = [h]^a [g]^b = t^a (\ell t^{-2})^b = t^{a-2b} \ell^{a+b} \tag{4.4}$$

e quindi

$$a + b = 0, \quad -2b = 1 \tag{4.5}$$

o

$$a = -b = \frac{1}{2} \tag{4.6}$$

Pertanto la relazione tra il tempo e g deve essere:

$$T = c\sqrt{\frac{h}{g}} \tag{4.7}$$

dove c è una costante. L'analisi dimensionale non fissa *c*, ma il risultato ha nondimeno la sua utilità. Per esempio, se vogliamo confrontare il tempo di caduta di due gravi ad altezze diverse avremo

$$\frac{t'}{t} = \frac{\sqrt{\frac{h'}{g}}}{\sqrt{\frac{h}{g}}} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \tag{4.8}$$

che non dipende da *c*. Analogamente se vogliamo confrontare i tempi di caduta di due gravi che cadono dalla stessa altezza sulla terra e sulla luna si ha:

$$\frac{t_L}{t_T} = \sqrt{\frac{g_T}{g_L}} = \sqrt{\frac{9.68}{1.72}} \approx 2.15 \tag{4.9}$$

qui t_L e t_T sono i tempi di caduta di un grave sulla luna e sulla terra rispettivamente, mentre 9.68 e 1.72 sono le accelerazioni di gravità sulla terra e sulla luna espresse in $m\ s^{-2}$.

Un'altra semplice applicazione, molto simile alla precedente, è il calcolo del periodo delle piccole oscillazioni di un pendolo semplice. Trascurando gli attriti, e per piccole oscillazioni, il periodo del pendolo dipende solo dalla lunghezza e dall'accelerazione di gravità (non dipende dalla massa, perchè l'unica forza è quella di gravità e tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione). Quindi

$$T = f(l, g) = c l^a g^b \tag{4.10}$$

e anche in questo caso dovremo avere:

$$[T] = c^a [g]^b = c^{a+b} t^{-2b} \tag{4.11}$$

da cui

$$T = c\sqrt{\frac{l}{g}} \tag{4.12}$$

Vediamo adesso come sia possible ricavare la terza legge di Keplero sul moto dei pianeti da considerazioni dimensionali. Ricordiamo che questa legge dice che, nell'approssimazione di considerare le orbite dei pianeti come circolari, il quadrato del periodo di rivoluzione di un pianeta attorno al sole è proporzionale al raggio dell'orbita al cubo. Scriviamo la seconda legge di Newton per questo caso. Qui la forza di attrazione tra un pianeta ed il sole segue dalla legge della gravitazione universale

$$F = G\frac{mM_S}{R^2} \tag{4.13}$$

dove *G* è la costante di gravitazione universale, m è la massa del pianeta, M_S la massa del sole e *R* la distanza sull'orbita del pianeta dal sole. La seconda legge di Newton

(*F* = *ma*) ci dice che

$$ma = G\frac{mM_S}{R^2} \tag{4.14}$$

Vediamo che la massa del pianeta si cancella da entrambi i lati di questa equazione e quindi le caratteristiche cinematiche del moto del pianeta, in particolare il periodo, non dipendono da m, ma dipendono solo da *G*, M_S e *R*. Dunque per il periodo *T* avremo:

$$T = f(R, G, M_S) \tag{4.15}$$

Le dimensioni di *G* possono essere dedotte dalla (4.14), con il risultato

$$[G] = m^{-1}l^3t^{-2} \tag{4.16}$$

Pertanto posto

$$[T] = [R]^a[G]^b[M_S]^c = l^{a+3b}t^{-2b}m^{-b+c} \tag{4.17}$$

si trova

$$a + 3b = 0, \quad -2b = 1, \quad -b + c = 0 \tag{4.18}$$

e risolvendo questo sistema di tre equazioni in tre incognite si trova facilmente a = 3/2 e $b = c = -1/2$, da cui

$$T = c\sqrt{\frac{R^3}{GM_S}} \tag{4.19}$$

Quadrando entrambi i lati di questa equazione si trova

$$T^2 = kR^3 \tag{4.20}$$

dove k è una costante identica per tutti i pianeti dato che dipende da c, G e M_S.

5. Come cuocere un tacchino

Vediamo adesso una applicazione un po' più elaborata di questi metodi. Un problema interessante è: quanto tempo si deve far cuocere nel forno un tacchino (o un pollo) a seconda del suo peso. In questo problema compaiono varie grandezze:

- t = tempo di cottura
- T = temperatura del tacchino
- T_0 = temperatura del forno
- P = peso del tacchino
- ρ = densità del tacchino
- σ = coefficiente di diffusione termica

Le dimensioni di queste quantità (in particolare di P, ρ e σ) sono:

$$[P] = mlt^{-2}, \quad [\rho] = ml^{-3}, \quad [\sigma] = l^2t^{-1} \tag{5.1}$$

Vediamo come le quantità fisiche da cui dipende il problema siano di due tipi, le temperature T e T_0 con dimensioni termodinamiche (temperatura) e le grandezze con dimensioni di tipo meccanico. Dunque potremmo formare due quantità adimensionali di cui una T/T_0 mentre per l'altra formeremo la combinazione $\sigma^a \rho^b P^c t^d$. Dato che

$$[\sigma^a \rho^b l^c t^d] \quad f^{2a-3b+c} m^{a+b} t^{-2a-3b-2c+d} \tag{5.2}$$

risolvendo le tre equazioni che derivano dall'azzerare tutti e tre gli esponenti (ricordiamo che questa quantità deve essere adimensionale) si ottiene un sistema omogeneo di tre equazioni in quattro incognite. Si possono dunque trovare tre delle quantità *a, b, c*, *d* in funzione di una di esse, per esempio *a*. Il risultato è

$$b \quad \frac{2}{3}a, \quad c \quad -\frac{2}{3}a, \quad d \quad a \tag{5.3}$$

Questo significa che la combinazione

$$\left(\sigma\left(\frac{\rho}{P}\right)^{2/3} t\right)^a \tag{5.4}$$

è adimensionale per qualunque scelta di *a*. Pertanto si dovrà avere una relazione del tipo (vedi (4.2)):

$$\frac{T}{T_0} = f\left(\sigma\left(\frac{\rho}{P}\right)^{2/3} t\right) \tag{5.5}$$

A temperature T e T_0 fissate, se scaliamo le dimensioni del tacchino, le uniche quantità che variano sono t e P, dato che il coefficiente di diffusione e la densità non cambieranno. Pertanto vediamo che in queste condizioni si deve avere:

$$t \sim P^{2/3} \tag{5.6}$$

Come si vede dalla figura 13, questa relazione è ben soddisfatta.

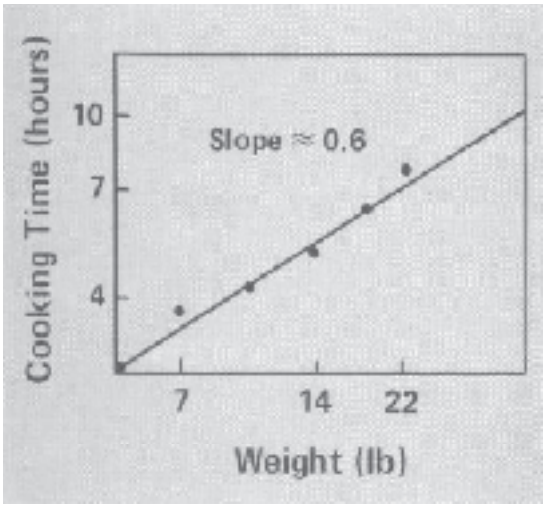


Figura 13 - Il tempo di cottura di un tacchino in funzione del suo peso.

6. L'energia della prima bomba atomica

L'esplosione della prima bomba atomica (avvenuta in una località denominata Ground Zero nel deserto di Alamogordo il 16 Luglio 1945) fu fotografata tramite foto ultrarapide con intervalli di circa 1/10 di millisecondo. Tutti i dati dell'esperimento furono tenuti segreti. Nel 1947 le foto furono rese pubbliche ed uscirono sulla la rivista *Life*. Dall'esame delle foto il fisico inglese Taylor fu in grado di determinare l'energia sviluppata dalla bomba e pubblicò i risultati dei suoi calcoli, ottenuti tramite l'analisi dimensionale [4]. L'energia della bomba era ancora un dato segreto e Taylor passò un brutto quarto d'ora con l'FBI. Quello che fece Taylor fu di determinare come variava il raggio della nuvola sollevata dall'esplosione con il tempo e confrontarla con i dati delle foto che permettevano il confronto numerico di queste quantità. Dato che in questa relazione entra l'energia della bomba, Taylor ne potè determinare l'energia con buona approssimazione.

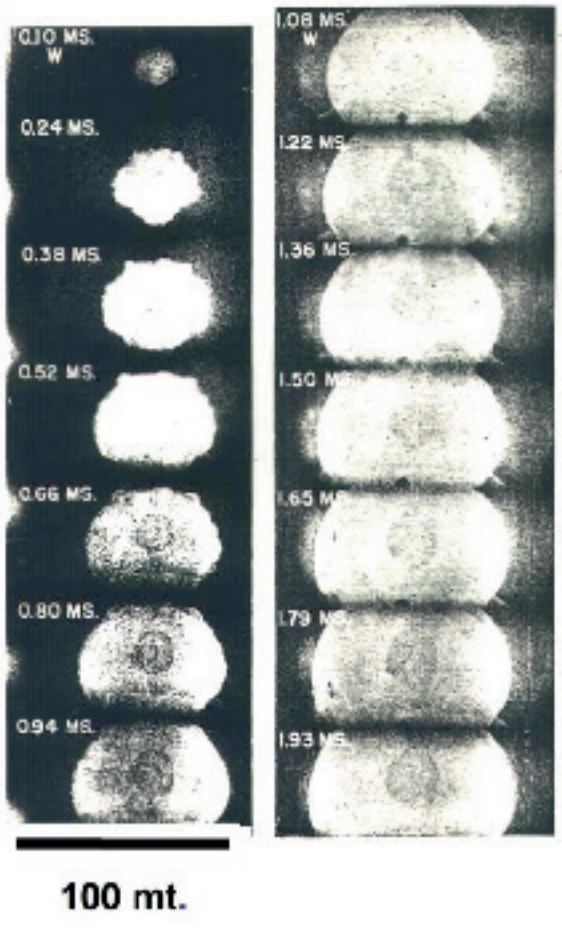


Figura 14 - La nuvola atomica che si espande al passare del tempo (Foto LIFE). Il raggio della nuvola era determinato tramite un mirino nella macchina fotografica, in grado di apprezzare una distanza di 100 metri, come mostrato in figura.

Il ragionamento di Taylor fu il seguente. Il gas della bomba ad alta temperatura si espande in aria. Quindi le quantità in gioco sono, l'energia della bomba, E, la densità dell'aria, ρ, il tempo di espansione, t, il raggio di espansione $R(t)$ e la pressione dell'aria,

p. Le dimensioni delle varie quantità sono:

$$|E| \quad m\ell^2t^{-2}, \quad |\rho| - m\ell^{-3}, \quad |t| \quad t, \quad |R| \quad \ell, \quad |p| \quad m\ell^{-1}t^{-2} - \frac{[E]}{[V]} \tag{6.1}$$

Chiaramente si possono formare due grandezze adimensionali (cinque grandezze per tre equazioni) che si determinano nel solito modo richiedendo che tutti gli esponenti che appaiono nella relazione dimensionale:

$$[E^a\rho^b t^c R^d p^f] = (m\ell^2t^{-2})^a(m\ell^{-3})^b t^c \ell^d (m\ell^{-1}t^{-2})^f \tag{6.2}$$

siano nulli. Risolvendo le corrispondenti equazioni in funzioni di c ed f si trova:

$$a = \frac{c}{2} - f, \quad b = -\frac{c}{2}, \quad d = -\frac{5}{2}c + 3f \tag{6.3}$$

La combinazione a primo membro della (6.2) diventa

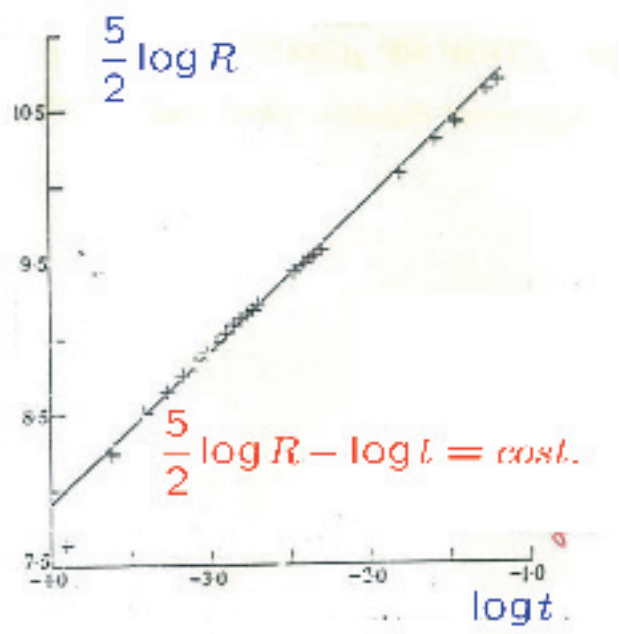


Figura 15 - Nella figura è riportato il logaritmo di R in funzione del logaritmo di t, che in base alla legge (6.9) deve essere una funzione lineare. Le croci sono i punti sperimentali ottenuti dalle fotografie di LIFE. Il valore della costante è legato alla densità dell'aria e dell'energia della bomba. Questo valore si deduce da questo grafico e si può quindi determinare E.

Le due quantità nelle parentesi devono essere separatamente adimensionali (la verifica per il secondo termine è immediata perchè la pressione ha le dimensioni di una energia diviso un volume). E quindi per il teorema di Buckingham:

$$\frac{Et^2}{\rho R^5} = f\left(\frac{pR^3}{E}\right) \tag{6.5}$$

La funzione *f* può essere calcolata nel caso dell'espansione normale di un gas in aria e si trova che *f(0) = 1*. Dato che pR^3 rappresenta l'energia gravitazionale dell'aria in

una sfera di raggio R ed E è l'energia della bomba, segue che $pR^3 << E$ e quindi si può approssimare il secondo membro con 1. Risulta

$$\frac{Et^2}{\rho R^5} \sim 1 \tag{6.6}$$

da cui

$$R \sim \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/5} t^{2/5} \tag{6.7}$$

Poichè E e ρ sono fissati si deduce che

$$R \quad ct^{2/5} \tag{6.8}$$

o, prendendo il logaritmo di entrambi i lati di questa equazione:

$$\mathrm{Log}R = \frac{2}{5}\mathrm{Log}t - \mathrm{Log}c \tag{6.9}$$

dai dati che si ricavano dalle foto (R in funzione di t) e dalla conoscenza della densità dell'aria, Taylor fu in grado di calcolare l'energia della bomba, circa 20 kilotoni (vedi figura 15).

7. Conclusioni

In questa breve discussione abbiamo mostrato l'utilità del principio di similitudine o più propriamente dell'analisi dimensionale per risolvere una serie di problemi anche complicati. Per esempio, la derivazione usuale della terza legge di Keplero parte dall'integrazione della equazione differenziale di Newton, $F = ma$. Questa integrazione richiede conoscenze di matematica un po' più raffinate di quanto non se ne abbia a livello della scuola secondaria. Al contrario i metodi basati sull'analisi dimensionale richiedono solo conoscenze di tipo algebrico. In pratica si riducono alla soluzione di un sistema lineare di equazioni. Ovviamente, la semplificazione in questa procedura è essenzialmente di tipo matematico. Per quanto concerne invece l'aspetto fisico, al fine di ottenere risultati corretti è fondamentale capire quali siano le variabili rilevanti che intervengono nel fenomeno considerato. Va da sè che quest'ultimo aspetto è fondamentale anche nel caso in cui si faccia ricorso ad una risoluzione diretta delle equazioni che descrivono il sistema in esame.

Bibliografia

[1] Buckingham E., On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations, *Physical Review* 4, 345, 1914.

[2] Fourier J., *Theorie Analitique de la Chaleur*, 1822.

[3] Galilei G., *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, Appresso gli Elsevirii*, Leyda, 1638 (il passo citato è dall'edizione a cura di A. Carugo e L. Geymonat, Boringhieri, Torino 1958, pp. 143–144).

[4] Taylor G. I., The formation of a blast wave by a very intensive explosion, *Proceedings of the Royal Society*, A 201, 175, 1950.

Meteoriti: natura e provenienza

Curzio Cipriani

Accademia Nazionale dei Lincei
già Direttore del Museo di Storia Naturale dell'Università degli Studi di Firenze

1. Meteore, meteoroidi, meteoriti

La notte di S. Lorenzo (10 agosto) è proverbiale per le «stelle cadenti», cioè per l'osservazione delle *meteore***,** fenomeni luminosi connessi ai *meteoroidi***,** detti anche bolidi, corpi celesti di passaggio nella nostra atmosfera ad un'altezza di qualche decina di Km e alla velocità dell'ordine di qualche decina di Km/s.

Questi meteoroidi si presentano non solo in maniera sporadica, ma spesso in veri e propri sciami che appaiono di solito in alcuni momenti dell'anno legati al passaggio di comete e distinti sulla base della provenienza apparente dalla volta celeste. Per una buona osservazione è evidente che occorre un cielo completamente sereno e libero da qualsiasi ostacolo. L'agosto è un mese che ben si presta a queste condizioni e così si possono osservare le Perseidi (dalla costellazione del Perseo) con sciami fino a un massimo di 90 meteore per ora che, col tempo, si è spostato dal 10 di S. Lorenzo al 12 del meno noto S. Rufino. Il passaggio dei meteoroidi può comunque essere registrato con ogni condizione meteorologica mediante radar così che si è potuto accertare dei passaggi imponenti verso la metà di novembre con le Leonidi (costellazione del Leone), la metà di dicembre con le Geminidi (dai Gemelli) e ai primi di gennaio con le Quadrantidi (dal Quadrante, antico nome della costellazione di Boote), tutti mesi nei quali le condizioni di avvistamento non sono certo ideali.

I meteoroidi possono bruciare completamente nell'atmosfera oppure giungere sulla nostra Terra, diventano allora le *meteoriti***,** corpi celesti come frammenti di planetesimi o di asteroidi o di pianeti.



Fig. 1 - Antica stampa che raffigura uno sciame di meteore.

2. Meteoriti: dimensioni e frequenze stimate

Sulla base delle loro dimensioni è possibile distinguere le vere e proprie meteoriti, comprese generalmente da qualche metro al centimetro, dalle *micrometeoriti***,** dal millimetro al decimo di millimetro (100 micrometri), fino alla *polvere cosmica* che può arrivare a qualche micrometro. Nelle dimensioni delle meteoriti si registra pertanto una lacuna, all'incirca dal centimetro al millimetro. La spiegazione va ricercata nel comportamento dei corpi celesti all'ingresso nell'atmosfera terrestre con conseguente sviluppo di calore per l'attrito legato alle altissime velocità di caduta. I meteoroidi più grandi tendono ad esplodere generando frammenti più piccoli di varie dimensioni. I frammenti di dimensioni medie vedranno poi ridotto il loro volume per fusione e volatilizzazione delle parti esterne, quelli di dimensioni molto piccole riusciranno a smaltire il modesto calore prodotto dall'attrito, quelli a dimensioni intermedie saranno invece destinati alla sparizione per completa volatilizzazione.

La Terra è sottoposta ad un continuo bombardamento di meteoriti, si stima che ogni giorno ne cadano circa 100 tonnellate per la quasi totalità, circa il 99 %, di micrometeoriti e polvere cosmica, e pertanto invisibili, mentre solo l'1 % è costituito dalle meteoriti.

Non è facile rinvenire una meteorite. Anche se il numero di questi corpi è alto, occorre pensare innanzi tutto che gli oceani costituiscono oltre il 70 % della superficie della Terra e che quindi la massima parte delle meteoriti finisce in fondo al mare. La restante parte che cade sul terreno è sottoposta, come qualsiasi altro materiale, all'alterazione atmosferica e pertanto tende a trasformarsi rendendosi così sempre meno riconoscibile. Si comprende allora che i luoghi dove più facilmente si potranno recuperare le meteoriti siano i deserti, in quanto zone a bassissima umidità, e quindi di alterazione trascurabile, sia caldi, come il Sahara e l'Australia occidentale, sia freddi, come l'Antartide.

Naturalmente il numero di meteoroidi che possono far cadere meteoriti sulla Terra è inversamente proporzionale alle loro dimensioni. Così si stima che bolidi dell'ordine di 2 metri (e quindi di peso dell'ordine di una decina di tonnellate) possono avere una frequenza di caduta di qualche centinaio all'anno, meteoroidi rivelabili solo per via fotografica, dell'ordine di 2 centimetri (e un peso di 10 grammi) si possono valutare in un milione all'anno fino a giungere a frequenze calcolabili in migliaia di miliardi per i meteoroidi identificabili solo via radar aventi dimensioni del decimillimetro (pesanti circa un decimilligrammo).

3. Distanze Sole - Pianeti

Un grande interesse scientifico riveste la provenienza delle meteoriti. Il primo passo è la conoscenza del sistema solare e, in particolare, l'esame delle distanze fra il Sole e i vari pianeti che orbitano attorno ad esso. Fin dalla seconda metà del XVIII secolo era stata individuata una legge empirica, detta di Titius-Bode dal nome di due astronomi tedeschi che l'avanzarono, che legava tutte le distanze fra il Sole e i pianeti del suo sistema mediante una semplice formula matematica

$$d = 0.4 + 0.3 \times 2^n$$

dove d è la distanza Sole-pianeta, in unità astronomiche cioè ponendo 1 la distanza Sole-Terra, e n un numero intero, salvo l'artificio di meno infinito per Mercurio.

La tabella seguente riporta il confronto fra le distanze calcolate secondo questa legge e quelle effettive.

Pianeta	Legge Titius - Bode		Distanza effettiva
	n	d	
Mercurio	$-\infty$	0.4	0.39
Venere	0	0.7	0.72
Terra	1	1.0	1.00
Marte	2	1.6	1.52
……...	3	2.8	……...
Giove	4	5.2	5.20
Saturno	5	10.0	9.55
Urano	6	19.6	19.22

Questa legge, mentre forniva valori ben concordanti per le varie distanze, ivi compresa anche quella dell'ultimo pianeta scoperto, Urano, studiato fra gli altri proprio da Johann Bode, prevedeva anche un altro pianeta con l'orbita fra quelle di Marte e di

Giove. Molti astronomi si misero in caccia del pianeta mancante, la prima segnalazione fu di Giuseppe Piazzi, direttore dell'Osservatorio Astronomico di Palermo, che la prima notte del secolo XIX (esattamente il 1° gennaio 1801) scoprì un nuovo oggetto che si muoveva lentamente rispetto alle stelle e che risultava, da determinazioni successive, avere un'orbita di 2.8 unità astronomiche, come previsto dalla relazione empirica. Le sue dimensioni erano molto piccole, tanto da essere chiamato «pianetino», ma ebbe comunque il suo nome: Cerere. Nel breve giro di pochi anni ne furono scoperti altri tre, Pallade, Giunone e Vesta e poi nel corso degli ultimi due secoli un numero sempre maggiore, tanto che ad oggi se ne conoscono oltre 100.000, tutti con orbite ben determinate e tutti compresi in una fascia compresa fra quelle di Marte e di Giove. Il pianeta mancante si è rivelato essere un insieme innumerevole di pianetini che oggi sono comunemente noti col nome di *asteroidi***,** entità celesti che orbitano nella fascia omonima.

Non è il caso di soffermarci sulle teorie relative all'origine di questi asteroidi, sarà sufficiente dire che, mentre in un primo tempo si pensava che fossero i frammenti di un solo grande pianeta esploso forse per un gigantesco impatto, gli astronomi oggi ritengono che, al contrario, si tratti di una mancata formazione di un pianeta da parte dei planetesimi esistenti che non si sono potuti riunire, forse a causa della perturbazione indotta dalla vicinanza di un grande pianeta come Giove, in un'unica massa, ma al più in pochi oggetti di dimensioni inferiori, talvolta ulteriormente frammentati per urti reciproci.

La quasi totalità delle meteoriti ha origine dagli asteroidi, anche se per qualche raro esemplare la composizione chimica indica una provenienza diversa, in qualche caso dalla Luna, in altri da Marte, un materiale generato, in questi casi per ablazione da parte di bolidi dotati di massa e velocità enormi che hanno colpito il satellite o il pianeta ad angoli di impatto particolari.

4. Meteoriti: testimonianze dell'antichità

Numerose sono le testimonianze dall'antichità sulla caduta delle meteoriti e, in particolare, sulla natura ferrosa di alcune di esse, come vedremo più avanti.

Gli antichi Egizi e i Sumeri chiamavano il ferro «metallo del cielo», in particolare gli antichi Egizi «rame nero del cielo», la volta del cielo era detta «*sidereos ouranos*» (cioè cielo di ferro) dai Greci e i Romani forse associarono il metallo direttamente alle stelle chiamandole «*sidera*».

La particolarità del materiale meteoritico, soprattutto quello metallico, e, talvolta anche l'osservazione diretta della sua caduta dal cielo, ha ovviamente stimolato non solo la curiosità ma addirittura la venerazione del materiale oggetto di un tale evento prodigioso. Ne sono prova il ritrovamento di frammenti in tombe dell'antico Egitto e degli Indiani d'America, o significativi toponimi come «lago sacro» per un cratere di impatto, o l'uso come potente talismano da parte di popoli primitivi.

Non mancano le testimonianze dirette. Nel libro di Giosuè della Bibbia (X/11)

si legge: «Il Signore fece cadere dal cielo su di loro [gli Amorrei] grosse pietre e ne morirono più per la grandine di pietre che per la spada dei figli di Israele». Ma ne parlano anche autori classici, come Tito Livio che ricorda la pioggia di sassi sul Monte Albano sotto il regno di Tullo Ostilio (614 a.C.) o Pindaro che afferma essere caduto in Tracia un masso grande come un carro (476 a.C.) o infine Anassagora che parla di un masso caduto dal Sole a Egospotamos nel 407 a.C.. D'altra parte è ovvio che il ferro meteorico sia stato utilizzato, forse già nel III millennio a.C., come materiale pronto per l'utilizzazione ancor prima dell'inizio della difficile metallurgia del ferro, per l'alta temperatura richiesta, a partire dai suoi minerali. E' quanto sembra sia accaduto per gli Ittiti che ne approfittarono per sconfiggere gli Egiziani.

Qualche sporadico accenno si ha anche nel Medio Evo, soprattutto in Boemia, ma proprio nella data che convenzionalmente segna la fine di questo periodo storico (1492), i cittadini di Ensisheim in Alsazia furono testimoni diretti della caduta di una grossa meteorite, rappresentata in numerose litografie dell'epoca, e che suscitò molte discussioni tanto che fu coniato il detto «*de hoc lapide multi multa, omnes aliquid, nemo satis*» (su questa pietra molti hanno detto molte cose, tutti qualcosa, nessuno abbastanza) a significare l'interesse dell'avvenimento e la difficoltà di una sua spiegazione. Tuttavia, anche in relazione agli altri avvistamenti in alcune parti d'Europa, questa caduta di pietre dal cielo fu comunemente accettata come un dato di fatto dai vari studiosi.

Un brusco cambiamento di idee si ebbe con la rivoluzione scientifica del Seicento, con gli approfonditi studi astronomici, che tacciò di credulità tutte queste affermazioni e, anche a causa della mancanza di cadute documentate nel periodo, si giunse ad affermare che i materiali legati a queste cadute (le meteoriti) non esistevano , ma anche se fossero esistiti, sarebbero stati di origine terrestre, dato che non erano stati individuati corpi celesti fra la Terra e il suo satellite, la Luna, o gli altri pianeti. Così Cartesio nel 1640 le considerò derivate da esalazioni terrestri, condensate in nuvole e poi precipitate dai fulmini, un'idea mantenuta anche nel Settecento, com'è testimoniato da un'affermazione del Lavoisier del 1772: «la caduta di pietre dal cielo è fisicamente impossibile».

Una svolta decisiva si verifica alla fine del secolo, nel 1794. Nell'aprile di quell'anno un fisico tedesco, Ernst Florenz Chladni (1756-1827), ben noto in campo scientifico per i suoi studi di acustica, dopo aver esaminato una strana pietra cosparsa di granuli metallici presentata al naturalista tedesco Peter Pallas in una delle sue spedizioni scientifiche in Siberia dagli abitanti del luogo che l'avevano vista cadere, pubblicò un'opera in cui sosteneva apertamente l'origine cosmica delle meteoriti. Il caso volle che solo due mesi dopo, in giugno, nelle vicinanze di Siena cadesse una meteorite. Osservata da molti presenti, fu esaminata a lungo dagli studiosi innescando così un ampio dibattito scientifico che si concluse a favore dell'origine cosmica delle meteoriti. Due momenti decisivi per giungere a questa conferma furono la constatazione, nel 1802 da parte dell'inglese Luke Howard, che il ferro meteorico, a differenza di quello terrestre, presentava sempre notevoli contenuti di nichel e subito dopo la conferma da

parte del fisico e astronomo francese Jean-Baptiste Biot di questa particolarità su una meteorite vista cadere da tanti cittadini di L'Aigle in Francia nel 1803. Nonostante queste prove scientifiche occorsero però alcuni decenni, fin verso la metà dell'Ottocento, perché l'origine celeste delle meteoriti fosse accettata da tutti gli studiosi.

5. La natura delle meteoriti

Si parla sempre di meteoriti al plurale e, in effetti, questi materiali possono essere abbastanza diversi fra loro, anche come aspetto, come è schematizzato dalla figura 2 che riassume i vari tipi di meteoriti.

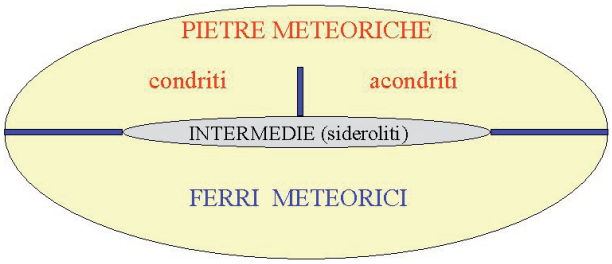


Fig 2 - Schema della composizione delle meteoriti.

Una prima fondamentale suddivisione può essere fatta fra «*pietre*» e «*ferri*», facilmente distinguibili da un semplice esame visivo, a loro volta le «pietre», che costituiscono i materiali più comuni fra le meteoriti, si dividono in «*condriti*» e «*acondriti*» a seconda della presenza o no dei «*condruli*», minuscole sferette, di circa un millimetro, rivelabili con sicurezza solo all'esame microscopico. Molto rari sono, infine, dei prodotti intermedi, detti appunto «*sideroliti*», formati in parti approssimativamente uguali da materiale roccioso e metallico.

Per tutti questi materiali è stata misurata un'età dell'ordine di 4.6 miliardi di anni, quella cioè della formazione dei pianeti del sistema solare, Terra compresa.

Non ancora del tutto chiara è l'origine di queste condrule, anche se la maggioranza degli studiosi propende per una formazione all'interno della nebulosa solare a temperature non molto superiori ai 1000°, comunque sufficienti per la fusione a gocce della polvere cosmica, un materiale che si può considerare pertanto «indifferenziato». Tutte le altre meteoriti, invece, hanno subito una «differenziazione», cioè sono il prodotto di cambiamenti in direzioni diverse della loro natura iniziale. E' per questo motivo che questi tre diversi tipi di meteoriti, acondriti, sideroliti e ferri meteorici, sono stati paragonati ai materiali esistenti in tre diverse zone della Terra, rispettivamente al limite fra crosta e mantello, fra mantello e nucleo, al nucleo. Non è forse inutile ricordare che crosta, mantello e nucleo sono le tre zone concentriche della Terra, paragonabili rispettivamente alla buccia, alla polpa e al nocciolo di un frutto.

I componenti chimici delle meteoriti sono naturalmente gli stessi delle rocce terrestri. Tuttavia si può notare che le percentuali sono sensibilmente diverse per quanto riguarda le pietre meteoriche, e sono limitate al ferro-nichel per i ferri meteorici, come appare chiaramente dalla seguente tabella:

Elemento	Pietre meteoriche	Ferri meteorici	Rocce terrestri
O	34.5 %	----	46.6 %
Fe	26.9	89.5 %	5.0
Si	17.6	----	27.7
Mg	14.0	----	2.1
S	2.1	----	0.1
Ni	1.4	9.3	----
Ca	1.2	----	3.6
Al	1.2	----	8.2

6. I minerali delle meteoriti

Le meteoriti sono state, e lo sono tuttora, oggetto di approfonditi studi che hanno consentito, fra l'altro, l'identificazione dei minerali costituenti. A fine Ottocento erano stati riconosciuti nelle meteoriti solo 16 minerali, di cui 4 esclusivi, a questo inizio di millennio, grazie all'affinamento delle tecniche in particolare di vari tipi di microanalisi, ne sono stati identificati ben 105, di cui 30 esclusivi.

I minerali dominanti sono analoghi ai costituenti principali anche di importanti rocce terrestri, come i basalti, cioè *olivina, pirosseni, plagioclasi*, cui si deve aggiungere però un materiale inesistente sulla crosta terrestre, il *ferro-nichel*. Di notevole interesse scientifico, anche se presenti in quantità minori, sono naturalmente i minerali tipici, cioè esclusivi, delle meteoriti, oltre il ferro-nichel, si conoscono infatti diversi carburi, nitruri, fosfuri, solfuri alcalini, qualche silicato particolare (ad es. un granato con silicio in coordinazione sei), molto pochi sono invece i carbonati, i solfati e i fosfati e addirittura completamente assenti i borati.

Il quadro che si desume dall'insieme di questi minerali per quanto riguarda l'ambiente di formazione delle meteoriti è pertanto quello caratterizzato da:

- alta pressione
- ambiente riducente
- alta concentrazione di zolfo
- alti contenuti di ferro, nichel, cromo, fosforo e titanio

un ambiente genetico, quindi, ben diverso da quello della crosta terrestre e confrontabile con quello ipotizzabile per l'interno della Terra e, solo in parte, verificato per la parte superiore del mantello terrestre, i cui prodotti possono giungere sulla superficie terrestre dopo averne attraversato la crosta.

7. Gli impatti sulla Terra

Le immagini sempre più chiare e dettagliate della superficie della Luna, costellata da innumerevoli crateri di dimensioni diverse, ci danno un'idea di come sarebbe la superficie della nostra Terra se non fosse difesa da una consistente atmosfera e, soprattutto, se non

fosse continuamente rigenerata dall'azione dei vari agenti geologici: idrici, sismici e vulcanici.

L'impatto di meteoriti di grandi dimensioni sulla nostra Terra ha, ovviamente, provocato la formazione di crateri la maggior parte dei quali è scomparsa ad opera del rimodellamento geologico, soprattutto in zone di età giovane, ma talvolta, anche in queste zone, è ancora possibile dedurne l'esistenza passata grazie alle foto aeree o alla presenza sul terreno di rocce vetrose di fusione per l'azione combinata della pressione dell'urto e del riscaldamento derivante.

Le conseguenze di questi impatti possono essere state disastrose al massimo grado. E' questo il caso dell'estinzione di massa che ha segnato la fine dell'era Mesozoica (detta anche Secondaria) e il passaggio a quella Cenozoica (o Terziaria), è il cosiddetto limite K/T dei geologi dove K sta per il periodo Cretaceo (l'ultimo del Mesozoico) e T per l'era Terziaria. Un limite identificato a circa 66 milioni di anni fa, con un evento di grande importanza per la scomparsa repentina (in termini di tempi geologici) di circa il 70 % delle specie viventi, ivi compresi i famosi dinosauri. Molti indizi, soprattutto geochimici (in particolare un anomalo alto contenuto di iridio, un metallo simile al platino, in argille formatesi in quel periodo in molte parti del mondo), hanno fatto pensare che questa estinzione di buona parte dei viventi, e perciò definita di massa, sia da mettere in relazione con la caduta di una grande meteorite che avrebbe sconvolto la vita sulla Terra. Studi geofisici hanno individuato un possibile cratere da impatto nella penisola dello Yucatan in Messico e nel prospiciente Golfo: si sarebbe trattato di un cratere del diametro di circa 180 km prodotto dall'urto di un bolide valutato dell'ordine di 10 km. Il clima sarebbe stato drasticamente modificato in tutto il pianeta per periodi molto lunghi così da portare alla morte della maggioranza delle specie viventi.

Un altro grandissimo cratere del diametro di circa 50 km è stato individuato nella Germania meridionale ed ha la caratteristica di avere al centro la cittadina storica di Nordlingen. Il riconoscimento è avvenuto grazie alle particolari rocce vetrose che ne costituiscono il perimetro ed è stupefacente l'ipotesi, molto ben fondata, che la caduta dell'enorme meteorite abbia proiettato anche notevoli quantità di un materiale vetroso particolare, detto *tectite*, nella Moldavia, la regione della Repubblica Ceca a circa 400 km di distanza.

Un caso diverso è rappresentato da un fenomeno storicamente accertato. Nel 1908 nella Siberia centrale nei pressi del fiume Tunguska, affluente del grande Jennisei, si ebbe la distruzione di quasi 2000 km^2 di foresta con un'esplosione udita a centinaia di km di distanza legata ad una palla di fuoco più accecante del Sole senza però che si sia avuta la formazione di un cratere da impatto. Infatti non vi fu nessuna caduta di una meteorite, ma solo la vaporizzazione di un enorme meteoroide, forse un frammento di una cometa, valutato essere stato dell'ordine di un centinaio di metri esploso a qualche km di altezza.

Un'esplosione analoga, anche se di molto minore intensità e senza danni al territorio,

è quella avvenuta pochi anni or sono, il 19 gennaio 1993 in piena notte nel cielo della Romagna, in particolare sopra la cittadina di Lugo, con uno splendore paragonabile a quello del Sole. L'esplosione di un bolide probabilmente di dimensioni di circa 5 metri e del peso di un centinaio di tonnellate, è avvenuta ad una quota valutata in circa 30 km ed ha generato una grandissima quantità di micrometeoriti sferiche dell'ordine di 100 micrometri sparse in una zona molto ampia.

8. Il rischio cosmico

I rischi naturali cui l'umanità è sottoposta e che purtroppo mietono molte vittime, oltre a produrre danni materiali, sono ben conosciuti: terremoti (e maremoti), eruzioni vulcaniche, alluvioni, siccità, frane. Sono ben conosciuti soprattutto perché le comunicazioni di massa ce ne forniscono purtroppo frequenti documentazioni e sappiamo essere collegati alla vita geologica della nostra Terra. Quello, però, di cui ignoriamo l'esistenza è un ulteriore rischio, sempre naturale, ma di provenienza extraterrestre: è il «rischio cosmico», che non è legato all'invasione di marziani o comunque di «alieni», ma alla possibilità di essere colpiti da oggetti provenienti dallo spazio.

Questo tipo di rischio normalmente non viene preso in considerazione perché è estremamente basso rispetto agli altri rischi naturali. E' infatti fondamentale pensare che è possibile definire il rischio come il risultato del prodotto di due fattori:

rischio = probabilità dell'evento x danno ipotizzabile

Per i rischi naturali i due fattori non sono facilmente quantificabili e dovremo accontentarci di una loro stima qualitativa, per la probabilità da molto remota a molto frequente e per il danno da trascurabile a disastroso. E' così evidente che ogni possibile intervento di protezione, che comunque è oneroso in termini sia monetari sia di limiti alla libertà personale, deve essere commisurato al rischio. Pertanto si può considerare accettabile un rischio legato, ad esempio, a un danno anche alto se l'evento è supposto poco probabile oppure, al contrario, un danno lieve anche se legato a un evento abbastanza frequente; dovranno invece essere prese tutte le precauzioni possibili in tutti gli altri casi che comportino rischi notevoli secondo il risultato del prodotto dei due fattori sopraccitati.

La stima della probabilità di impatto di una meteorite sulla nostra Terra può essere fatta a partire da una relazione empirica, basata purtroppo su pochi dati disponibili, che lega la frequenza di una caduta con le dimensioni delle meteoriti. Per una meteorite di grandissime dimensioni, del tipo di quella ipotizzata per l'estinzione di massa K/T (quella dei dinosauri) cioè dell'ordine di 10 km e del peso di 10^{11} t (100 miliardi di tonnellate), la frequenza è stimata dell'ordine del centinaio di milioni di anni (ne sono passati già 66!), per un evento di notevole importanza come Tunguska si stima qualche secolo, mentre una frequenza molto maggiore, circa un centinaio di volte all'anno, si può valutare per eventi simili a quello di Lugo.

La comunità scientifica in questi ultimi anni ha richiamato l'attenzione dell'opinione

pubblica al problema del rischio cosmico sollecitando i politici a rendersi conto del problema e a iniziare a fronteggiarlo.

Negli ultimi anni del secolo appena trascorso è stata presentata una scala del rischio cosmico molto semplice articolata su quattro termini:

- I livello – disintegrazione quasi completa del bolide nell'alta atmosfera, con caduta di piccole meteoriti, con danni irrilevanti all'ambiente e alle persone. Bolide minore di 50 metri, frequenza almeno 10 eventi per anno (tipo Lugo).
- II livello – frammentazione del bolide nella bassa atmosfera, con caduta di meteoriti anche di grandi dimensioni, con effetti locali altamente distruttivi (con devastazioni di vaste zone, incendi, maremoti) ma senza gravi conseguenze climatiche globali. Bolide con diametro fino a qualche centinaio di metri, frequenza un evento ogni 100-200 anni (tipo Tunguska).
- III livello – esplosione al suolo o vicino ad esso con crateri di urto di 20-30 km, con distruzioni a scala globale che provocano gravi conseguenze sul clima di breve durata, terremoti, calo della temperatura di 10-20° per qualche settimana per oscuramento del cielo da polvere, carestie, epidemie. Bolide di diametro fra 1 e 5 km, frequenza qualche centinaio di migliaia di anni.
- IV livello – evento catastrofico con cratere di impatto di oltre 100 km, con ricadute disastrose sull'ambiente protratte per secoli e conseguenti estinzioni di massa, vastissime aree di distruzione con incendi, terremoti e maremoti, iniziale crollo della temperatura di 20-30° per qualche anno seguito da un forte aumento di questa per effetto serra per almeno un millennio. Bolide con diametro maggiore di 10 km, frequenza 10-100 milioni di anni (tipo estinzione K/T).

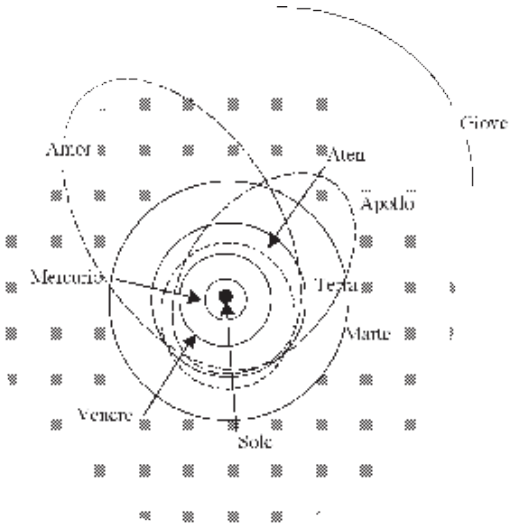


Fig. 3 - Orbite dei gruppi di asteroidi potenzialmente pericolosi, puntinata la vasta «fascia degli asteroidi» compresa fra le orbite di Marte e di Giove.

Una scala ancor più dettagliata è quella elaborata durante un congresso di planetologi qualche anno dopo. Dalla città che ospitò il congresso, ha preso il nome di «scala Torino» e si articola in 11 termini caratterizzati da probabilità di collisione fra oggetti celesti e la nostra Terra, partendo dal termine 0, a probabilità nulla, a 1-2 dove la bassa probabilità non richiede particolari attenzioni, a 3-4-5 dove è valutato un possibile incontro molto ravvicinato tale quindi da studiarlo seriamente, ai valori superiori per i quali si prevedono collisioni che diventano certe a livelli 8-9-10 e per evitare le quali bisognerà tentare ogni possibile intervento.

Studi e *interventi*, quindi. Gli *studi* sono essenzialmente astronomici e riguardano la sorveglianza degli asteroidi le cui orbite possono intersecare quella terrestre. Tre sono, in particolare, i gruppi di asteroidi sotto sorveglianza: il gruppo Amor con orbita fortemente ellittica che sfiora quella terrestre, ma soprattutto il gruppo Apollo con orbita poco eccentrica che, insieme al gruppo di asteroidi Aten aventi un'orbita quasi circolare, intersecano nettamente il cammino della Terra. La sorveglianza si estende quindi a molti piccoli asteroidi, definiti in generale come NEO (*Near Earth Objects*). E' quanto si propone il progetto *Spaceguard* che riunisce alcuni osservatori astronomici col compito di monitorare il percorso di questi oggetti celesti prevedendone le probabilità di incontri ravvicinati potenzialmente pericolosi.

In casi di allarme, che comunque dovrebbe poter avvenire con un rassicurante anticipo, salvo brusche e improvvise modifiche di percorso, si potrebbe mettere in atto degli *interventi*, atti a scongiurare lo scontro, che sembrano, al momento, quasi argomenti di fantascienza. Si può pensare a tecniche nucleari, ossia esplosioni termonucleari, come bombe all'idrogeno, che potrebbero generare in prossimità del bersaglio un fortissimo flusso di particelle nucleari tale da provocare il distacco di parte della crosta dell'oggetto, la cui perdita potrebbe essere sufficiente per modificare bruscamente la traiettoria dell'asteroide. E' stato calcolato che per un asteroide di 1 km questa modifica potrebbe avvenire con una bomba da 1 megaton, facilmente trasportabile da un vettore spaziale. Per onor di cronaca si può ricordare che sono state avanzate diverse altre proposte alternative, ancor più da fantascienza, come specchi riflettenti i raggi solari o simili, metodi tutti di dubbia efficacia.

BIBLIOGRAFIA

Cevolani G., *Il cielo e le sue piogge*, C.N.R., Pieve di Cento (Bologna) 2001.

Cevolani G., *Renazzo, una meteorite racconta la nostra storia*, C.N.R., Pieve di Cento (Bologna) 2001.

Di Martino M., *Gli asteroidi ed il rischio da impatto*, Museo di Scienze Planetarie, Prato 2005.

Dodd R., *Meteorites,* Cambridge University Press, Cambridge (UK) 1981.

Grady. M., Hutchinson R., Graham A., *Catalogue of Meteorites*, Nat Hist. Museum, Londra 2000.

Heide F. & Wlodtzka F., *Meteorites*, Springer, Berlino 1995.

Norton O.R., *Rocks from space,* Mountain Press, Missuola, Montana (U.S.A.) 1994.

La Biochimica del 2000

Gianni Cappugi

Ordinario di Biochimica, Dipartimento di Scienze Biochimiche, Università di Firenze

1. Introduzione

La biochimica è nata e si è sviluppata nel secolo scorso contribuendo in maniera determinante alla comprensione dei fenomeni biologici a livello molecolare. Infatti, agli albori di questa disciplina l'interesse scientifico preminente era quello di comprendere il destino chimico dei nutrienti e i meccanismi di sintesi di tutte le molecole biologiche grandi o piccole che fossero. Tutto questo viene definito come *metabolismo* cellulare e viene convenzionalmente suddiviso in *catabolismo* e *anabolismo*. Nel catabolismo avvengono fondamentalmente reazioni di ossidazione e quindi di distruzione delle biomolecole che hanno il fine ultimo di produrre energia e molecole semplici che rappresentano le condizioni perché si realizzi l'anabolismo, nel quale avvengono le reazioni di sintesi di tutte le molecole che fanno parte del corredo di un organismo vivente.

Il primo passo della ricerca biochimica si è identificato con la decifrazione e l'identificazione delle cosiddette *vie metaboliche*, ove per «via metabolica» si intendono tutte quelle reazioni chimiche concatenate che permettono la trasformazione (per ossidazione o per sintesi) delle singole biomolecole (carboidrati, lipidi, proteine, acidi nucleici). Il secondo passo è stato la identificazione e caratterizzazione dei catalizzatori biologici che permettono alle vie metaboliche di avvenire in tempi velocissimi: questi catalizzatori sono fondamentalmente proteine e prendono il nome generico di *enzimi*. Il terzo passo, o fase, coincide invece con lo studio dei meccanismi di regolazione della velocità delle singole vie metaboliche e questa fase ha dimostrato che di nuovo gli enzimi hanno un ruolo importante: infatti, in ogni via metabolica esiste almeno un enzima cosiddetto «segnapasso» la cui attività catalitica può essere spenta o potenziata a seconda delle esigenze metaboliche cellulari.

Infine, un avanzamento importante alle conoscenze dei meccanismi biochimici si è realizzato grazie alla messa a punto di tecnologie che hanno permesso la determinazione della struttura tridimensionale di macromolecole come le proteine e gli acidi nucleici; gli ultimi anni del secolo scorso hanno visto un'esplosione degli studi sulla struttura delle macromolecole biologiche lasciando una eredità culturale importantissima agli attuali ricercatori.

Qual è il panorama scientifico in cui si muove e si muoverà il biochimico del duemila? Intanto si deve rilevare che quella identificazione dei ruoli nella ricerca

biologica che fino a metà del secolo scorso era abbastanza netta – per cui non si poteva confondere un biochimico con un genetista o con un cosiddetto morfologo –, con la nascita della biologia molecolare e poi della biologia cellulare ha cominciato a farsi via via sempre più sfumata, tanto che oggi è più difficile dare una definizione precisa della biochimica che non coinvolga aspetti scientifici che interessano anche la morfologia , la biologia cellulare, la biologia molecolare o la genetica. Per semplificare un po' questo quadro interdisciplinare si può ancora dire, forzando un po' la cosa, che comunque l'interesse scientifico che accomuna la maggioranza dei biochimici è rappresentato dalle proteine.

Detto questo, vediamo, senza con questo voler esaurire l'argomento, quali sono le linee di ricerca che attualmente ricevono i maggiori consensi: «Studi sul folding delle proteine», «Studi sul meccanismo di azione degli enzimi e progettazione di inibitori specifici», «Proteomica», «Meccanismi di segnalazione cellulare», «Motori molecolari», «Nuove funzioni di RNA».

2. Studi sul *folding* di proteine

Con il termine di *folding* s'intendono tutti quei processi attraverso i quali ogni proteina acquisisce la propria struttura nativa. La struttura nativa è la struttura che ogni proteina presenta nel proprio ambiente naturale permettendole di svolgere una specifica funzione. E' noto da tempo che la struttura tridimensionale di una proteina dipende dalla sua sequenza amminoacidica codificata da uno specifico gene e, in certi casi limite, basta anche la differenza nella posizione in sequenza di un solo amminoacido per avere una struttura tridimensionale diversa (per esempio, l'emoglobina S nell'anemia falciforme). La mole enorme degli studi fatti sulle strutture delle migliaia di proteine note ha permesso di capire quali sono i principi che permettono ad una certa sequenza di strutturarsi localmente (strutture secondarie) ma non hanno ancora dato indicazioni in che modo si possa raggiungere rapidamente la forma finale funzionante.

A questo proposito è utile citare il *paradosso di Cyrus Levinthal* il quale ha preso in considerazione il caso teorico di una ipotetica proteina formata da 100 amminoacidi:

assumendo che ogni amminoacido possa assumere (scegliere) tre conformazioni diverse, il numero di strutture dovrebbero essere 3^{100} e prendendo come tempo minimo per passare da una conformazione ad un'altra il tempo di vibrazione di legame (10^{-13} s), il tempo necessario perché questa proteina raggiunga la propria conformazione nativa è uguale a $1{,}6 \times 10^{27}$ anni. Un tempo enorme! Ogni proteina dopo la sua sintesi a livello ribosomiale impiega tempi rapidissimi, nell'ordine dei secondi, per raggiungere la struttura nativa.

Molti ricercatori, di provenienza culturale diversa come biochimici, biofisici, biomatematici, stanno attivamente lavorando sui problemi del *folding* e nella maggior parte dei casi l'approccio sperimentale prevede un ribaltamento del fenomeno: si parte infatti da una proteina strutturata, la quale viene denaturata, nel senso che viene eliminato completamente l'avvolgimento tridimensionale, e successivamente si

cerca di far avvenire la rinaturazione in condizioni opportune. Questi studi, insieme a simulazioni portate avanti da complessi programmi *computer-based*, stanno lentamente portando a indicazioni sul meccanismo di folding. Per esempio, è oggi chiaro che non si tratta di un processo di «prova e riprova» quanto invece un processo cooperativo di stabilizzazione progressivo di strutture intermedie per favorire interazioni a distanza fra le varie parti della molecola proteica. Tuttavia, nonostante questo grande impegno internazionale, siamo ancora lontani dall'obiettivo!

Ma perchè sarebbe così importante conoscere le regole che permettono a una sequenza lineare di amminoacidi di organizzarsi un una struttura proteica tridimensionale?

Considerato che una qualsiasi proteina è in grado di portare avanti un certo tipo di funzione (catalitica, di trasporto, di difesa, di segnalazione, motoria etc.) proprio perché ha un certo tipo di struttura, conoscendo le regole che permettono a una specifica sequenza amminoacidica di assumere una specifica struttura tridimensionale, potremmo progettare in laboratorio proteine con sequenze amminoacidiche non presenti in natura in grado di svolgere particolari funzioni. Oltre a questo aspetto clamoroso, sarebbe comunque più semplice l'applicazione di questa forma di ingegneria proteica per il miglioramento funzionale di proteine note. Anche questo secondo aspetto potrebbe avere delle importanti ripercussioni di tipo pratico come l'utilizzazione di enzimi per produzioni industriali o agrarie, oppure per la loro applicazione in campo medico.

Inoltre, in questi anni è nato un grandissimo interesse intorno al cosiddetto *protein misfolding* cioè una non corretta strutturazione alla quale andrebbero incontro certe proteine in condizioni diverse dalla norma. Per fare un esempio che faccia comprendere l'interesse di questo aspetto, basta citare il caso di numerose malattie del sistema nervoso nelle quali si verificano fenomeni di *protein misfolding*.

Nel cosiddetto «morbo della mucca pazza» l'agente di trasmissione è costituito da aggregati di una proteina prionica la quale deriva da una proteina normale che è andata incontro ad un processo di *protein misfolding*. Nella malattia di Alzheimer si è visto che si formano fibre proteiche che derivano dall'aggregazione di un frammento che si genera da un precursore proteico e che contemporaneamente subisce un processo di *misfolding*.

3. Studi sul meccanismo di azione degli enzimi e progettazione di inibitori specifici

Questo settore della ricerca biochimica ha sempre appassionato i biochimici e ha rappresentato anche in passato il fiore all'occhiello dell'enzimologia.

Per stabilire il funzionamento a livello molecolare di un enzima occorre avere a disposizione la struttura tridimensionale dettagliata della proteina e in maniera particolare del cosiddetto «sito attivo» che costituisce quella parte di struttura dove i substrati (le molecole che devono subire una trasformazione) entrano in contatto con le catene laterali di specifici amminoacidi o con i gruppi chimici di specifici coenzimi per essere trasformati rapidamente in prodotti di reazione. Fortunatamente tutto ciò è

reso possibile dalla grande potenza e raffinatezza dei metodi di indagine che si basano fondamentalmente sulla diffrattometria dei raggi X e sulla Risonanza Magnetica Nucleare. Questi siti di legame sono modellati per poter accogliere il ligando e quindi la loro struttura dipende dalla forma e dalla grandezza dei ligandi; i siti di legame per le macromolecole sono generalmente localizzati sulla superficie dell'enzima e possono essere concavi, convessi o piatti mentre i siti di legame per piccole molecole sono delle fenditure, o una sorta di tasca o cavità, poste più profondamente nella struttura dell'enzima.

Per la individuazione dei siti di legame vengono impiegati metodi computazionali o metodi sperimentali. I metodi computazionali utilizzano una molecola sonda e i siti di legame sono identificati come regioni della struttura in cui l'energia di interazione calcolata tra la sonda e la proteina è favorevole al legame. I metodi sperimentali sono attualmente più precisi rispetto a quelli computazionali e si basano soprattutto su una tecnica cristallografica che prevede l'immersione dei cristalli proteici in un solvente organico che simuli il gruppo funzionale del ligando; in maniera simile si possono utilizzare anche metodi basati sulla Risonanza Magnetica Nucleare.

Una volta identificato il sito di legame, si passa alla ricerca dei gruppi funzionali che partecipano chimicamente al meccanismo di catalisi; i metodi tradizionali prevedevano una serie di analisi cinetiche, anche assai complicate, in presenza o assenza di inibitori o attivatori, mentre un approccio più moderno è rappresentato dalla mutagenesi sito-specifica.

La mutagenesi sito-specifica è una tecnica di ingegneria genetica che permette di ottenere in laboratorio strutture enzimatiche dove è stato sostituito uno specifico amminoacido per evidenziare la sua eventuale funzione nel meccanismo di catalisi.

Partendo da queste informazioni è oggi possibile, con sofisticati programmi computazionali, simulare e quindi progettare delle molecole che siano in grado di interagire con i siti di legame e con le strutture catalitiche bloccando l'attività catalitica dell'enzima. Questa operazione non può tuttavia prescindere da un approccio sperimentale, perché non sempre questa interazione è prevedibile esattamente. Infatti le proteine, e quindi anche gli enzimi, non sono strutture rigide bensì parzialmente flessibili e spesso questa flessibilità è essenziale per la funzione biologica dell'enzima. Il sito attivo, ad esempio, non ha sempre una struttura complementare ai substrati ma invece assume una struttura complementare al cosiddetto stato di transizione. Trovare una molecola che sia complementare a questa conformazione e che blocchi l'attività dell'enzima significa disporre di un forte inibitore specifico dell'enzima.

Tutto questo può avere una importante ricaduta ad esempio nel campo della salute pubblica (*Drug Design*). Per ricordare qualche esempio, il captopril è una molecola organica di sintesi che è in grado di legarsi e di bloccare il metalloenzima ACE (*angiotensin-convertig enzyme*) regolando così la pressione sanguigna. Un altro esempio da citare sono gli inibitori di una particolare aspartil-proteasi come è la proteasi dell'HIV; fra questi inibitori c'è l'aloperidolo e il crixivan che vengono usati come

farmaci nella terapia dell'AIDS. Il crixivan somiglia al peptide substrato della proteasi HIV ed è costruito intorno ad una struttura alcolica che simula lo stato di transizione; quando si lega all'enzima induce in questo il movimento di due ali flessibili dell'enzima che comporta la chiusura e quindi il blocco all'accesso dell'acqua nel sito attivo.

Questo tipo di studi può essere molto utile naturalmente anche in altri campi applicativi come il settore agrario o alimentare ma può avere anche una grande importanza nella ricerca pura quando si deve assegnare una funzione precisa ad una proteina: disporre di un inibitore altamente specifico per questa proteina significa poterne bloccare l'effetto in una cellula o in organismo e studiarne gli effetti.

4. Proteomica

La proteomica studia il cosiddetto proteoma, cioè, il corredo proteico di una cellula. Questi termini sono un riflesso di termini coniati per definire il patrimonio genetico: il genoma rappresenta infatti l'intera collezione di geni di un organismo. Attualmente questa terminologia si è allargata a tutti quei settori della biologia nei quali, invece di studiare la singola molecola di un certo tipo, si prendono in considerazione contemporaneamente tutte le molecole di quel tipo, per cui oggi si parla anche di trascrittoma, di interattoma e cosi via.

Per capire meglio possiamo vedere alcune differenze fra la proteomica e la chimica delle proteine: mentre la chimica delle proteine prende in considerazione di volta in volta la singola proteina, la proteomica studia miscele complesse di proteine; se nel primo caso si studia la sequenza amminoacidica completa della proteina, nel secondo è sufficiente una informazione parziale; nella chimica delle proteine si mira alla definizione della struttura e della funzione, mentre, nella proteomica, alla identificazione delle varie proteine attraverso una ricerca nei *database*.

Studiare il proteoma di una cellula non è la stessa cosa che studiare il genoma: infatti, mentre ogni nostra cellula presenta un genoma completo, non tutte le cellule hanno lo stesso proteoma perché in ogni singola cellula verranno espressi solo i geni che codificano per le proteine necessarie alle funzioni essenziali e per le proteine che assicurano funzioni cellula-specifiche.

Questo non significa che il proteoma sia più semplice del genoma, anzi è proprio il contrario. Ogni proteina infatti, anche se rappresenta il prodotto di un singolo gene può esistere in forme multiple in una stessa cellula o in cellule diverse e questo è dovuto essenzialmente a processi di modificazione della proteina (la cosiddetta maturazione) che incidono poi sulla struttura, sulla funzione, sulla localizzazione e sulla vita della proteina stessa.

La proteomica ha fondamentalmente quattro tipi di applicazioni:

1. identificazione e classificazione di tutte o quasi tutte le proteine presenti in un campione;
2. profilo di espressione proteica; l'identificazione di proteine in un particolare stato della cellula o organismo (es. differenziazione, sviluppo, malattia);

3. mappatura dell'interazione fra proteine; determinazione di come le proteine interagiscono l'una con l'altra nei sistemi viventi;
4. mappatura delle modificazioni di proteine; identificazione di come e dove le proteine vengono modificate.

5. Meccanismi di segnalazione cellulare

Le cellule sono sensibili a segnali che provengono dall'esterno, sotto forma di fenomeni chimici o fisici, e sono in grado di convertire questi segnali in una attivazione o disattivazione del proprio metabolismo, oppure sono capaci di modificare l'espressione di specifici geni in modo da modificare la concentrazione cellulare di particolari proteine.

Negli organismi multicellulari, segnali chimici provenienti da cellule diverse permettono la coordinazione di meccanismi fisiologici come risposta al segnale stesso. Ad esempio, quando un individuo si trova in una situazione di pericolo, le ghiandole surrenali rilasciano nel sangue l'adrenalina, un ormone che favorisce l'utilizzazione delle sostanze di riserva per consentire a certi tessuti come i muscoli di aumentare la propria funzionalità; per la mobilitazione delle sostanze di riserva, le cellule che le contengono devono sentire il segnale chimico (adrenalina) e trasferire questo segnale al proprio interno con un meccanismo di amplificazione del segnale stesso (*signal transduction*).

Queste vie di segnalazione sono spesso molto complesse e prevedono l'intervento di più molecole e reazioni organizzate in maniera lineare ma anche secondo vie ramificate non sempre chiare nella loro effettiva costruzione. Nonostante che il numero di queste vie aumenti continuamente grazie agli studi portati avanti da tantissimi laboratori di tutto il mondo, e nonostante che ogni via sia organizzata in maniera più o meno specifica, è possibile evidenziare alcuni principi e strategie comuni.

Uno stimolo provoca il rilascio di una molecola-segnale che prende il nome di «primo messaggero»; nella maggior parte dei casi il primo messaggero, per la sua natura chimica, non riesce a penetrare all'interno della cellula, per cui si lega a specifiche proteine localizzate sulla membrana plasmatica dette «recettori»; il legame del primo messaggero con il recettore induce in quest'ultimo una variazione di conformazione che mette in moto un processo biochimico che porta al rilascio all'interno della cellula di un «secondo messaggero»; alcuni importanti secondi messaggeri sono l'AMP ciclico, il GMP ciclico, lo ione calcio, l'inositolo 1,4,5-trifosfato e il diacilglicerolo; in questa fase inizia il processo di amplificazione del segnale: infatti, ogni singolo recettore attivato dal legame con il ligando è in grado di attivare un enzima che produce nell'unità di tempo un gran numero di molecole di secondo messaggero; il secondo messaggero direttamente , ma più spesso indirettamente attraverso strade complesse, attiva o inibisce specifici enzimi, specifiche pompe (proteine di trasporto) o specifici fattori di trascrizione di geni; dopo che la cellula ha risposto al segnale il processo di segnalazione viene opportunamente bloccato per permettere alla cellula di rispondere a nuovi segnali.

L'enorme interesse che esiste verso queste ricerche deriva dal fatto che oggi sappiamo che molti tipi di cancro sono associati a processi alterati di segnalazione dove ad esempio non si realizza una corretta terminazione del processo di segnalazione stessa.

Come esempio si può ricordare una via di segnalazione innescata dall'insulina.

L'insulina si lega ad uno specifico recettore il quale si autoattiva attraverso un processo catalitico di autofosforilazione; il recettore attivato catalizza la fosforilazione di specifiche proteine dette IRS (insulin-receptor substrates); le IRS fosforilate interagiscono con altre proteine come la fosfoinositide 3-kinasi che causa un aumento della concentrazione di fosfadil-inositolo 3,4,5 trifosfato (PIP3); il PIP3 attiva un altro enzima PDK1 che a sua volta attiva , sempre per fosforilazione un'altra proteina kinasi detta Akt; l'Akt attivata catalizza la fosforilazione di componenti che portano ad un aumento sulla membrana plasmatica di proteine trasportatrici di glucosio (GLUT4) oppure all'attivazione di enzimi che stimolano la sintesi di glicogeno; lo spegnimento del segnale avviene poi ad opera di enzimi (proteina-fosfatasi) che sono al loro volta finemente regolati.

6. Motori molecolari

I movimenti che possiamo osservare negli organismi viventi, dai più semplici come i batteri ai più complessi come gli animali, hanno tutti una origine molecolare in quanto prendono origine da molecole proteiche che funzionano come dei veri e propri motori sfruttando una fonte di energia per attuare delle modificazioni strutturali sincronizzate.

Questi motori molecolari possono utilizzare l'energia di idrolisi di molecole di ATP per ottenere lo scivolamento fra proteine fibrose , come succede nel caso di miosina, kinesina e dineina, oppure sfruttano la formazione di gradienti protonici per fare ruotare strutture complesse come i flagelli o come il più piccolo motore rotatorio esistente che ha la funzione di produrre molecole di ATP (ATP sintasi). Gli studi che sono stato condotti in questi ultimi anni sull'ATP sintasi hanno avuto uno sviluppo entusiasmante e hanno portato all'assegnazione di più di un premio Nobel l'ultimo dei quali è stato assegnato a John E. Walker per la struttura tridimensionale dettagliata.

Questo motore è formato da un rotore che è costituito da 10 proteine tutte uguali, inserite parallelamente nella membrana, e viene attivato dal passaggio di protoni. Il movimento rotatorio è trasmesso tramite una proteina di collegamento ad uno statore. Lo statore è a sua volta formato da diverse subunità e fra queste esistono tre subunità beta uguali le quali toccate con movimento rotatorio dalla proteina di collegamento sono in grado prima di legare ADP e fosfato inorganico, poi di formare ATP e quindi di liberarlo nel mezzo.

7. Nuove funzioni di RNA

Il grande interesse che attualmente suscitano le ricerche sulla funzione di RNA è nato con la scoperta che questa macromolecola non è solamente un messaggero al servizio del DNA ma è in grado di agire anche da catalizzatore, come gli enzimi, intervenendo

in importanti meccanismi cellulari come l'*auto-splicing*, il taglio di precursori, la modificazione sito-specifica, la traduzione e la regolazione dei geni.

Considerata la limitatezza dei gruppi funzionali presenti nell'RNA rispetto alla diversità delle catene laterali degli amminoacidi, grande fu la sorpresa quando Cech scoprì che alcune molecole di RNA possono comportarsi come gli enzimi aumentando la velocità di reazioni chimiche (ribozimi). Questa scoperta ha suggerito che i ribozimi possono aver avuto un ruolo fondamentale nei primi stadi dell'evoluzione della vita dove l'RNA poteva funzionare come materiale genetico e come catalizzatore per le reazioni primordiali del metabolismo.

Nella moderna biosfera la maggior parte delle funzioni enzimatiche appartengono alle proteine, tuttavia sono rimaste come fossili viventi alcune molecole di RNA con attività catalitica: gli introni che subiscono l'*autosplicing*, la Ribonucleasi P che processa i tRNA, i ribosomi che catalizzano la formazione del legame peptidico nella biosintesi delle proteine.

Un'altra scoperta recente riguarda la capacità dell'RNA di interferire con l'espressione di specifici geni (RNA *interference*).

Il meccanismo di silenziamento genico prevede il taglio di molecole di RNA a doppio filamento da parte di un particolare tipo di ribonucleasi, detta *Dicer*, così da formare frammenti a doppio filamento di 21-28 nucleotidi; questi frammenti vengono poi separati (probabilmente da una elicasi) in strutture a singolo filamento dette siRNA (*small interfering* RNA). Gli siRNA vengono poi incorporati in un sistema enzimatico complesso detto RISC (RNA-*induced silencing complex*), dove la sequenza nucleotidica di questi RNA serve come guida per legare e distruggere molecole di RNA messaggero che contengono una sequenza complementare.

Oltre al fatto che il silenziamento da RNA sta rivoluzionando la genomica funzionale, ci si aspetta per il futuro un impatto ancora maggiore se questo meccanismo di silenziamento genico specifico potrà essere applicato alla prevenzione di patologie umane.

Bibliografia

Breaker R.R., Natural and engineered nucleic acids as tools to explore biology, *Nature* 432, 838-845, 2004.

Capaldi R. A. and Aggeler R., Mechanism of the F_1F_0-type ATP synthase, a biological rotatory motor, *Trends in Biochemical Sciences*, 27, 154-160, 2002

Dobson C.M., Principles of protein folding, misfolding and aggregation Seminars in Cell and Developmental biology, 15, 3-16, 2004.

Liebler D.C., *Introduction to Proteomics,* Humana Press,Totowa,New Jersey 2002.

Scott J.D. and Pawson T. 'Cell communication: the inside story', *Scientific American*, 282, 72-79, 2000

Vega S., Kang L.W., Velazquez-Campoy A., Kiso Y., Amzel L.M. and Freire E., 'A structural and thermodynamic escape mechanism form a drug resistant mutation of the HIV-1 protease', *Proteins*, 55, 594-602, 2004.

Dinamica cognitiva: complessità e creatività. Un elogio dell'oblio

F. Tito Arecchi

Dipartimento di Fisica, Università di Firenze
Istituto Nazionale di Ottica Applicata

Sommario

Un problema scientifico formalizzato in un codice prefissato è traducibile in un corrispondente problema computazionale. Chiamiamo *complessità (algoritmica)* la lunghezza in bit dell'istruzione più corta che risolve il problema. Il *caos deterministico* caratterizza un generico sistema dinamico,rendendo il corrispondente problema pesante sia sperimentalmente sia computazionalmente, in quanto occorre ri-assegnare le condizioni iniziali a intervalli temporali più brevi del tempo di perdita dell'informazione,che è il reciproco della velocità di perdita dell'informazione, detta *entropia di Kolmogorov.*Si può controllare il caos aggiungendo nuovi gradi di libertà,cioè rimpiazzando l'informazione persa con quella portata dai nuovi gradi di libertà. Ciò equivale a un cambiamento di codice.

All'interno di un singolo codice, cambiare ipotesi vuol dire fissare gruppi diversi di parametri di controllo. A ciascun gruppo assegniamo una probabilità a priori,che va confrontata con l'esperienza e trasformata in una probabilità a posteriori, mediante il teorema di Bayes. L'applicazione sequenziale della regola di Bayes non è altro che la strategia darwiniana nell'evoluzione biologica. La sequenza è un algoritmo che sceglie la massima pendenza nello scalare un monte delle probabilità.L' esplorazione di ipotesi plausibili termina una volta raggiunta la massima probabilità.

Cambiando codice (cioè il pacchetto di variabili e mutue relazioni che descrivono il problema) si può ricominciare a formulare nuove classi di ipotesi. Chiamiamo *creatività* il cambiamento di codice, che è guidato da suggerimenti non formalizzati nel codice precedente, e pertanto non accessibili al computer.

Chiamiamo *complessità semantica* il numero di codici distinti o *modelli*, che descrivono in modo soddisfacente una situazione. Si tratta di un concetto sfumato per due motivi: 1) la nozione «soddisfacente» è convenzionale, legata a un certo contesto culturale; 2) se anche si raggiunge un accordo sul punto 1), il numero di cambiamenti varia a seconda dell'ambiente entro cui è inserito il sistema in esame (il sistema è aperto).

Queste considerazioni sono illustrate con riferimento a un compito cognitivo,

partendo dalla sincronizzazione dei neuroni in un'area percettiva e discutendo il passaggio dalla percezione alla cognizione.

1. Introduzione

In questo contributo definisco il concetto di *complessità* e ne illustro il ruolo in un programma scientifico. Il titolo può sembrare strano: qual è mai la connessione fra *complessità* e *creatività?* Cercherò di formulare risposte soddisfacenti alla seguente domanda: *come trasformiamo le percezioni in messaggi carichi di significato?*

A questo riguardo scopriremo delle ambiguità non eludibili: nella misura in cui ci poniamo domande di senso, ci accorgiamo che possiamo arrivare alla stessa risposta partendo da percezioni diverse; viceversa, possiamo attribuire significati differenti allo stesso oggetto percepito, senza variarne la descrizione fenomenica; c'è una specie di *complementarità* fra fenomenologia e significati. Nasce allora il problema: *come delimitiamo l'ambito dei significati per avere descrizioni fenomeniche obiettive,cioè invarianti per tutti?*

Parliamo allora di *visione scientifica* e della sua obiettività, come raggiunta rinunciando a domande di significato. L'ideale sarebbe un unico codice di lettura del mondo. Se tutto fosse riconducibile entro quest'unico codice, qualunque problema potrebbe essere risolto da un computer sufficientemente potente. D'ora in poi designeremo come *macchina di Turing* tale computer; i suoi algoritmi dovrebbero farci risolvere qualunque problema; la *complessità (algoritmica)* di un problema sarà allora definita come la lunghezza in bit dell'istruzione più corta che risolve il problema. Vedremo come le molteplici definizioni d'uso corrente siano varianti di questa definizione fondamentale. Chiameremo *complicazione* una misura di complessità relativa a un preciso codice descrittivo.

Qui però interviene un fatto cruciale, di cui abbiamo preso atto solo da alcuni decenni. I processi dinamici che implicano il *caos deterministico*, pur essendo descritti da un codice relativamente semplice (un numero piccolo di equazioni non lineari accoppiate), perdono in maniera non sanabile l'informazione sullo stato iniziale da cui erano partiti, e pertanto possono approdare a tutto un ventaglio di possibili scenari. L'incertezza che avevamo esorcizzato rinunciando ai significati riemerge. Rimpiazzando l'informazione persa con nuova informazione proveniente dalle osservazioni, può essere opportuno ridefinire nuove variabili e regole di mutuo accoppiamento, cioè *cambiare codice di descrizione.*

Nell'ambito di un codice unico, la *complessità-complicazione* cresce al crescere della velocità di perdita dell'informazione. Invece, il cambiamento di codice può portare a una nuova descrizione a bassa complessità: è questo l'aspetto saliente della creatività scientifica.

Quando un fenomeno è descrivibile da codici diversi, parleremo di *complessità semantica* distinta dalla complessità *algoritmica*. È opportuno annettere un valore, o significato, a un codice nella misura in cui esso sia associato a gradi diversi di

complicazione. Vediamo dunque che una pluralità di codici equivale a quella pluralità di significati che avevamo creduto di eliminare dal discorso scientifico.

Nel cambiare codice, cioè nel formulare un nuovo modello, dobbiamo introdurre nuove ipotesi. Partendo da un certo gruppo di ipotesi, a ciascuna delle quali assegniamo con argomenti di plausibilità un certo grado di probabilità a priori, il confronto con i dati sperimentali privilegerà una di queste ipotesi rispetto alle altre; avremo cioè probabilità a posteriori più aderenti alla situazione da descrivere. È questo il teorema di Bayes, che è la base dell'inferenza scientifica, e che si è creduto di poter automatizzare dotando un computer di un programma corrispondente e facendone così un *sistema esperto,* cioè un sistema che elaborando un pacchetto di dati sia in grado di elaborare una *diagnosi* su un certo fenomeno.

La probabilità a posteriori *sceglie* l'ipotesi più opportuna per costruire un modello procedurale. La ripetizione sequenziale di: *formulazione di ipotesi – confronto con l'esperienza – selezione dell'ipotesi con probabilità a posteriori massima* sembra assicurare una procedura scientifica ottimale. Tale è in definitiva la strategia darwiniana di mutazione e selezione del carattere che meglio si adatta all'ambiente: l'adattamento (*fitness*) rappresenta la scalata del monte delle probabilità, verso valori sempre maggiori.

Vedremo però che la strategia bayesiana-darwiniana funziona solo in uno scenario con un singolo picco di probabilità. In presenza di picchi multipli – come peraltro accade in situazioni sufficientemente «complesse» (e qui usiamo il termine in senso qualitativo) – occorre fuoriuscire dall'automatismo del teorema di Bayes e avere il coraggio e la fantasia di inventare ipotesi non immediatamente in linea con la situazione finora osservata e spiegata, cioè apprestarsi a scalare un monte di probabilità diverso da quello fino ad allora seguito. Questa cesura con la procedura precedente rappresenta un cambiamento di codice descrittivo, e – se confortata dai dati sperimentali – è la base per la formulazione di una nuova teoria. Abbiamo dunque indicato dei salti discontinui non delegabili al computer: essi sono la base della *creatività scientifica* e rappresentano una scelta libera, non determinata dalla situazione precedente. Si tratta di un atto squisitamente umano, che non ha un equivalente nelle procedure di una macchina. Avendo dovuto introdurre uno scenario con molti picchi di probabilità, sembrerebbe naturale associare il termine *informazione* (che nella definizione di Shannon è una misura di probabilità) ai vari punti che si inerpicano su un picco particolare, e invece di chiamare *significato* il paesaggio complessivo con una molteplicità di picchi. Allora la *complessità semantica* può essere misurata dal numero di picchi distinti cui corrispondono descrizioni scientifiche diverse.

Finora ci siamo mossi su un terreno puramente epistemologico, descrivendo procedimenti cognitivi che ci permettono di affrontare situazioni disparate. Che valore ontologico dobbiamo attribuire al paesaggio a molti picchi di probabilità? Se l'immagine rappresentasse il mondo come esso è, indipendentemente da noi, avremmo allora trovato uno strumento per descrivere tutte le possibili teorie e quantificare la complessità semantica. Vediamo però subito che non è così. Noi siamo simultaneamente spettatori

ed attori; e le nostre azioni conseguenti alle nostre valutazioni cognitive modificano lo spazio delle probabilità prima vigente, in modo tale da dover considerare il nostro modello come descrittivo di un passato che ormai non esiste più.

Consideriamo ad esempio uno studioso di economia, che formula descrizioni dinamiche dei mercati finanziari. Se lo studioso ha elaborato una descrizione soddisfacente e ne informa altri agenti o se ne vuole servire per giocare in borsa, immediatamente il suo intervento causa reazioni multiple da parte degli altri agenti che alterano il paesaggio di probabilità.

Si potrebbe obiettare che in molte situazioni l'atto di misura dell'osservatore non altera sostanzialmente lo stato di fatto: se uno osserva le stelle non ne altera il moto. Ciò non è più vero nel mondo quantistico, dove, per effetto dell'*entanglement*, una perturbazione localizzata altera globalmente tutto il sistema. Effetti visibili di tal fatta sono oggetto di sperimentazione fra chi sta cercando di realizzare computer quantistici; ma tutto ciò va al di là di quanto si prefigge questo lavoro (non definisco con precisione l'*entanglement*: basti dire che è un legame inestricabile fra situazioni apparentemente in mutuo conflitto, come ad esempio gli stati di gatto vivo e di gatto morto nel famoso esempio di Schrödinger).

2. La visione scientifica

Con la scienza moderna, si tenta di ripulire ogni resoconto sul mondo da quelle ambiguità che richiedono una interpretazione; evitando quest'ultima, si fuoriesce dal soggettivo e si approda a descrizioni valide per tutti.

La complessità nasce dal tentativo di una costruzione logica del mondo a partire dalle «*affezioni quantitative*» in cui frantumiamo un oggetto di esperienza, piuttosto che «*tentarne l'essenza*» (G. Galilei, Lettera a Marco Welser, 1610). Supponiamo di scomporre una mela nelle sue *affezioni quantitative*, cioè nelle proprietà distinte che possiamo misurare: sapore, odore, colore, forma etc. Ad ognuno di questi *punti di vista* corrisponde un apparato di misura che fornisce un numero. Se abbiamo scelto un pacchetto adeguato di indicatori, la collezione ordinata dei numeri corrispondenti a ciascuna misura dovrebbe caratterizzare la mela.

L'approccio è motivato dalla convinzione che si possa raggiungere una descrizione completa di un oggetto di esperienza attraverso i suoi «*atomi di significato*» misurabili con apparati di misura che forniscono numeri ripetibili e indipendenti dagli stati dell'osservatore (esempio della mela: odore, colore, sapore, etc., oppure, più radicalmente, gli atomi di cui essa è composta). Ogni oggetto diventa così un elemento definito di un insieme di Cantor, espresso da una collezione ordinata di numeri utilizzabili come dati di ingresso in una teoria matematica che permetta di prevedere il futuro

Come vedremo, la procedura appena delineata può bastare per il rifornimento del magazzino di un mercato, però non esaurisce la realtà della mela. In effetti l'*intero* (la mela) precede le misure separate, che forniscono quantità derivate, non primitive: si appoggiano alla mela ma una volta enucleate (tecnicamente: *astratte*) non permettono

la ricostruzione logica della mela: non siamo mai sicuri che nel futuro non compaia un ulteriore *punto di vista* inedito che sia misurabile e che arricchisca la descrizione della mela.

Prendiamo l'esempio del genoma umano. Sono stati individuati 30.000 geni, cioè tratti di sequenze di basi che codificano proteine; ma unendo tutti i tratti si arriva all'1% della lunghezza totale del genoma; il 99% – non codificante – espleta funzioni che stiamo appena cominciando a chiarire. L'insorgere di correlazioni tra tratti diversi (per esempio un gene la cui espressione dipende dalle proteine codificate da altri geni) rende *complesso* il problema nel senso che non ne abbiamo esaurito il significato con il semplice elenco dei geni.

Gli esempi più convincenti vengono dalla linguistica. Prima nasce il linguaggio articolato, la poesia, le favole, e poi da queste si estrae un lessico. L'operazione inversa, partire dal vocabolario e programmare al computer un testo letterario, è fallimentare. In questo ordine di complessità rientra la traduzione da una lingua all'altra. Esistono macchinette per cavarsela alla stazione o al ristorante in Cina; ma per un testo elaborato, per esempio Omero, il traduttore non è automatico: piuttosto è un bilingue che vive le situazioni di Ulisse in Greco e le racconta in Italiano. Questo ruolo del traduttore è discusso in un bel libro: *Il grande codice (la Bibbia e la letteratura)* di Northrop Frye (Einaudi, Torino 1986); l'autore si pone il problema: come mai la Bibbia scritta in Ebraico (lessico di 5.000 vocaboli) può essere tradotta in Inglese (il cui lessico comprende 500.000 vocaboli)? La risposta è che una procedura come la traduzione letteraria non può essere condensata in un elenco di operazioni di macchina, e perciò non può essere automatizzata.

Siamo dunque in presenza di due accezioni di complessità: una, scientifica, legata alla difficoltà di fornire una descrizione soddisfacente, un'altra (che è di natura *semantica*), legata alla possibilità di attribuire significati diversi allo stesso oggetto di esperienza, a seconda del punto di vista da cui ci si colloca. Quel che disturba è l'apparente relativismo della seconda. Peraltro, la complessità semantica sembra essere più fondamentale; essa rappresenta il limite della presunzione ideologica della fisica dei componenti elementari di essere l'unica descrizione rilevante del reale: il cosiddetto *riduzionismo*.

Ci proponiamo di definire rigorosamente la complessità scientifica e di chiarire le procedure che permettano un consenso sulla selezione dei significati.

3. Complessità e caos

Nella risoluzione al computer di un problema, la complessità rappresenta il costo del calcolo; essa pertanto presenta due aspetti:

- *spaziale*: quantità di risorse di macchina da impegnare, una volta convenuto di riferirsi al programma più corto (*CA = complessità algoritmica* di Chaitin,1965);
- *temporale:* tempo necessario all'esecuzione, una volta scelto il programma più corto (*D = depth (spessore) logico* di Bennett,1985).

Esploriamo questo secondo aspetto. Sia t_1 l'unità di tempo necessaria per descrivere un singolo elemento, e si abbiano N elementi. Se le loro proprietà si sommano (come i fagioli in un sacco) cioè se l'oggetto composto di N elementi è cresciuto per *giustapposizione,* allora il tempo totale necessario T è:

$$T = N\, t_1$$

Se invece la crescita è per «*intussuscezione*» (uso un vecchio termine della filosofia della natura che vuol dire che gli elementi non si limitano a giustapporsi, ma si accoppiano fra di loro con modalità non prevedibili a partire da un'ispezione del singolo elemento; es. tipico: una collezione di vocaboli di un lessico, disposti convenzionalmente in ordine alfabetico nel dizionario, rispetto a come invece si organizzano nel verso di un poeta) allora il tempo totale non è la semplice somma dei tempi individuali, e addirittura l'estensione (*size*) N del sistema composto può figurare ad esponente:

$$T' = 10^N t_1$$

Vediamo alcuni esempi di T e T'. Sia $t_1 = 1$ microsec = 10^{-6} sec. Per $N = 10$, si ha: $T = 10\ t_1 = 10^{-5}$ sec; invece, $T' = 10^{10} t_1 = 10^4$ sec, che è ancora praticabile (si tratta di meno di tre ore). Per $N = 100$, si ha $T = 100\ t_1 = 10^{-4}$ sec; invece, $T' = 10^{100}\ t_1 = 10^{94}$ sec (molto più lungo dell'età dell'universo che è circa 10^7 sec/anno $\times$ 10^{10} anni = 10^{17} sec).

La complessità, scegliendo una delle due definizioni viste, è quantificabile, ma nell'ambito di un problema di calcolo, per ridurci al quale abbiamo ridotto il mondo a un solo codice di lettura: pertanto la diremo piuttosto *complicazione*, in quanto rappresenta l'impegno di una macchina che lavori all'interno di un codice descrittivo prefissato. Nell'ambito di una formulazione dinamica, genericamente è presente caos deterministico. Se prepariamo il sistema in uno stato iniziale, l'informazione corrispondente si perde nel corso del tempo. L'informazione persa per unità di tempo è un *invariante* dinamico*,* cioè una caratteristica intrinseca non legata a un cambiamento di rappresentazione; essa è detta *entropia metrica*, o *entropia di Kolmogorov K*.


Dinamica non lineare a 3 o più corpi
(CAOS DETERMINISTICO)
Stabilità trasversale alla traiettoria ( ) di un segmento di punti iniziali
attorno a . A sinistra moto regolare; a destra moto caotico con perdita di
informazione (: traiettorie da condizioni iniziali diverse da)

Figura 1 - Caos deterministico. La traiettoria (linea spessa con freccia) calcolata con una certa legge dinamica è unica per una condizione iniziale assegnata, qui indicata da una stella. Le coordinate del punto iniziale sono in genere numeri reali che tronchiamo a un numero finito di cifre; pertanto la condizione iniziale non è un punto euclideo, ma un segmento. Condizioni iniziali a destra o sinistra di quella ideale convergono verso la traiettoria calcolata o ne divergono a seconda che la stabilità trasversale sia di tipo valle (a sinistra) o colle (a destra). Poincaré fece vedere che a partire dal problema a 3 corpi (ricordiamo che Newton aveva risolto quello a 2 corpi!) può accadere genericamente la situazione di destra, che oggi chiamiamo caos deterministico, con perdita di informazione sulla scelta iniziale che sarà più o meno rapida a seconda della ripidità del colle.

K risponde alla domanda: se osserviamo il sistema per un tempo così lungo che l'informazione per unità di tempo diventi invariante, che informazione abbiamo sul futuro? Orbene, la risposta è:

1. $K = O$ per un sistema *ordinato*; infatti, in un sistema deterministico, una volta esauriti i transitori, non si ha un extra d'informazione per un extra di osservazione;
2. $K \to \infty$ per un sistema *disordinato*; infatti, per quanto a lungo si osservi un moto browniano, non si sa mai dove il sistema andrà a un istante successivo;
3. *K* è *finito* per un sistema *caotico*; l'informazione si consuma gradualmente.

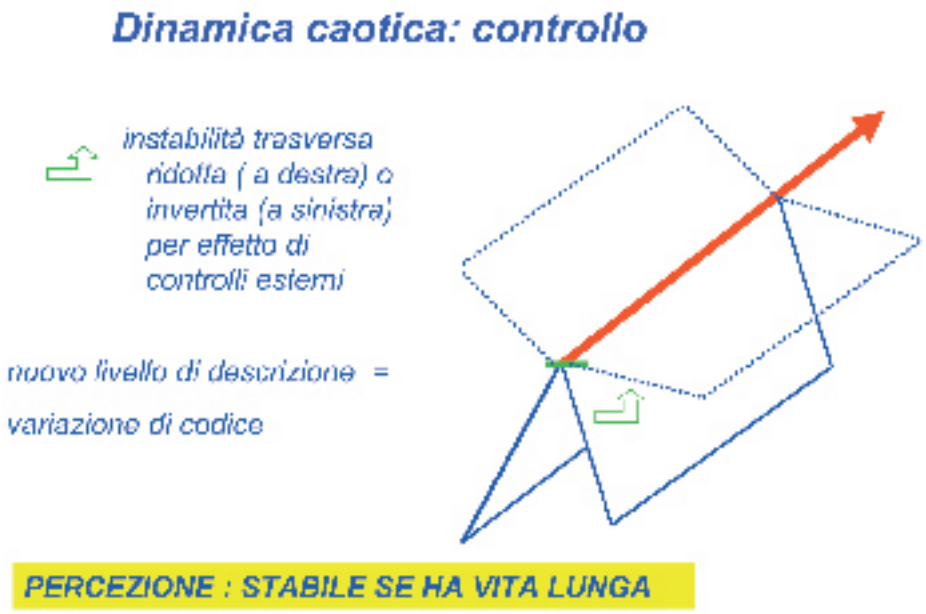

Dinamica caotica: controllo
instabilità trasversa ridotta (a destra) o invertita (a sinistra) per effetto di controlli esterni
nuovo livello di descrizione =
variazione di codice
PERCEZIONE : STABILE SE HA VITA LUNGA

Figura 2 - Controllo del caos. Il caos può essere controllato dall'esterno, aggiungendo altre azioni dinamiche che – senza perturbare la traiettoria longitudinale – alterino la pendenza del colle. Nel caso percettivo, è plausibile pensare che i segnali top-down più opportuni siano quelli che assicurano una vita lunga alla dinamica collettiva dei neuroni. La selezione fra le possibili percezioni è perciò legata al loro tempo di conservazione dell'informazione.

In Fig.3 mostriamo come la *CA* di Chaitin o il *D* di Bennett variano in funzione di *K*. Nel primo caso è ovvio che per *K* tendente all'infinito (come per numeri *random*) non esiste un programma corto di calcolo, in quanto non c'è una guida per comprimere l'istruzione, ma occorre inserire in essa tutte le cifre, una dopo l'altra. Invece la durata di un programma che genera un numero *random* è cortissima: una volta scritta la (lunghissima, come appena detto!) istruzione basta comandare: *stampa!* (figura a destra). *CA* cresce linearmente con *K*: calcolare un numero *random* è costoso perché va dato cifra per cifra e non c'è una regola per prevedere le cifre successive; invece *D* raggiunge un massimo e poi torna a valori piccoli per numeri *random*: per questi, una volta scritto il programma, il tempo di esecuzione è minimo, in quanto non c'è una regola di evoluzione.

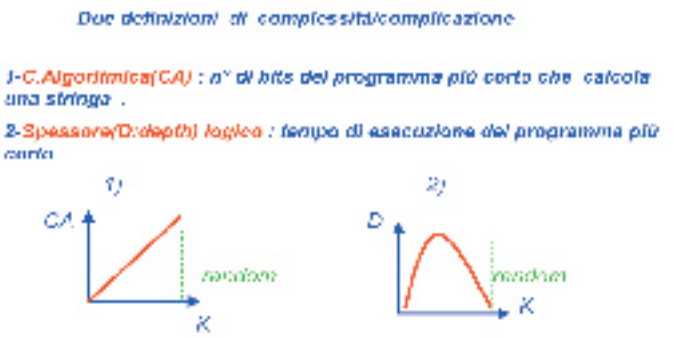


Figura 3 - Due definizioni di complicazione. 1) CA, complessità algoritmica (Chaitin, 1965) = numero di bits del programma più corto; 2) D (depth), spessore logico (Bennett, 1986) = tempo di esecuzione del programma più corto.

4. La complessità come complicazione, all'interno di un codice

Consideriamo situazioni fisiche che coinvolgono grandi folle di oggetti identici: gas in una cella, magneti elementari (spin).

Nel lavoro sull'*opalescenza critica* (1910) Einstein tiene conto delle interazioni fra le molecole di un fluido, non più viste come scorrelate. In condizioni normali, queste interazioni sono mascherate dall'agitazione termica, e le molecole sembrano indipendenti una dall'altra, come nel moto browniano. Se inviamo fasci di luce su una cella riempita con tali molecole (fig.4 a sinistra) la luce si inserisce fra una molecola e l'altra, e la cella è trasparente. Ma se ora aggiustiamo con accuratezza la temperatura vicino al valore critico, per cui l'agitazione termica uguaglia l'interazione molecolare, allora ogni molecola sente l'interazione dei vicini e si ritrova virtualmente distribuita su un volume molto maggiore di quello che essa occupava inizialmente; avremo, cioè, correlazioni a lungo raggio e la luce sarà riflessa da questi contorni del dominio di pertinenza di ciascuna molecola e perciò sarà sparpagliata un po' in tutte le direzioni, come farebbe una nebbia densa: chiamiamo questo fenomeno *opalescenza critica.* Se però abbassiamo ulteriormente la temperatura, il gas condensa in un liquido ad alta densità, le molecole saranno impaccate ciascuna attorno alla propria posizione e la cella sarà di nuovo trasparente. Dunque l'opalescenza critica caratterizza l'insorgere di notevoli interazioni mutue per cui non possiamo considerare più ogni molecola per conto proprio.

In modo concettualmente analogo, nell'emissione di luce i fotoni generati sono indipendenti se prevale l'emissione spontanea, ma per effetto dell'emissione stimolata si correlano fra loro: è questa la base concettuale del *laser* inventato qualche decennio dopo.

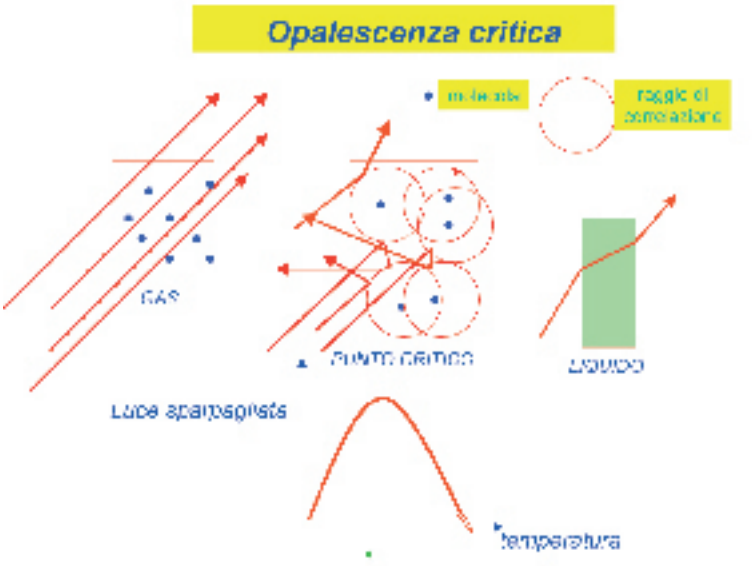


Figura 4 - Opalescenza critica. Ad alta temperatura le molecole del gas sono quasi indipendenti una dall'altra; se inviamo luce, questa intrude fra una molecola e l'altra, e la cella è trasparente (a sinistra). Portando la temperatura vicino al valore critico per cui l'agitazione termica uguaglia l'interazione molecolare, ogni molecola si ritrova virtualmente distribuita su un volume molto maggiore di quello che essa occupava inizialmente: avremo cioè cospicui raggi di correlazione (cerchi nella figura centrale); la luce sarà riflessa dai contorni di questi volumi e perciò sarà sparpagliata in tutte le direzioni, generando opalescenza critica. Se abbassiamo ulteriormente la temperatura, il gas condensa in un liquido ad alta densità: il fluido si comporterà otticamente come un vetro e la cella sarà di nuovo trasparente.

L'opalescenza critica caratterizza l'insorgere di notevoli interazioni mutue per cui non possiamo considerare più ogni molecola per conto proprio. Così come *D*, l'intensità della luce sparpagliata passa per un massimo fra fase disordinata (gas = alto *K*) e fase ordinata (liquido = basso *K*).

Come secondo esempio, consideriamo il modello di Ising (1925). Esso consiste in una collezione di aghi magnetici elementari, o *spin,* ciascuno vincolato ad assumere una fra due sole posizioni spaziali, o col Nord in alto (si sta parlando dei poli Nord e Sud di una calamita) o col Sud in alto. Spazialmente avremo una collezione di aghi magnetici tutti verticali e con la freccia (che indica il polo Nord) puntata in su o giù.

Per effetto delle mutue interazioni, gli spin tendono a disporsi tutti paralleli in una configurazione ordinata, per esempio tutti in su (fig. 14 a sinistra, colorazione scura). Ciò accade solo a basse temperature; se si aumenta la temperatura, l'agitazione termica di ciascuno spin contrasta con l'interazione mutua spin-spin, finché si arriva a una situazione del tutto disordinata, in cui è impossibile trovare alcuna struttura (*su* e *giù* rimescolati finemente, figura a destra). Nel mezzo, c'è una temperatura critica *Tc* a cui le due azioni si compensano e si formano domini estesi di spin in su (colore scuro) e in giù (colore chiaro), con forti fluttuazioni nella loro estensione, dovute alla competizione fra ordine (mutua interazione) e disordine (agitazione termica). Queste fluttuazioni rendono onerosa la descrizione in quanto, ripetendo l'osservazione, non

si registra la stessa cosa. Se chiamiamo *L* il numero totale di spin, cioè l'estensione del sistema, *D* è basso per basse o alte temperature, mentre cresce con una potenza frazionaria di *L* per *T=Tc.*

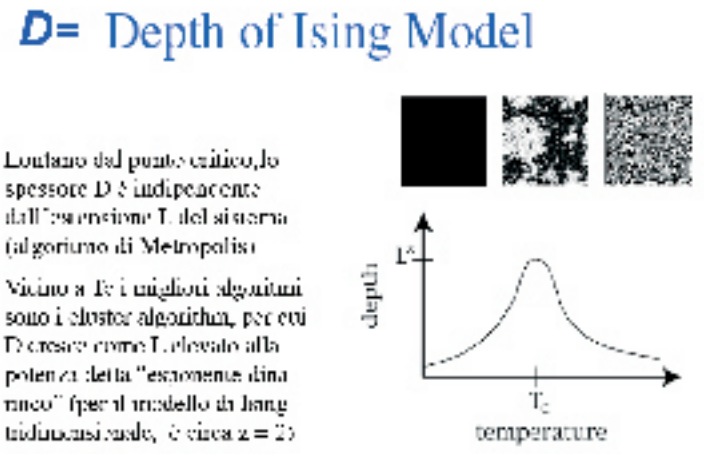


Figura 5 - Lo spessore logico del modello di Ising. Se chiamiamo L il numero totale di spin, cioè l'estensione del sistema, D è basso per basse o alte temperature, mentre cresce con una potenza frazionaria di L per T = Tc.

5. Riduzione di complessità per cambiamento di codice

La creatività scientifica è legata a un cambiamento di codice rispetto al programma riduzionistico, di assegnare posizione e velocità di ogni componente elementare. Si tratta di introdurre nuove variabili legate da nuove leggi. Ipotizzando nuove variabili che controllano il caos, riducendo *K* si introduce una teoria efficace che trascura le variabili veloci e descrive solo le variabili lente. In ciò si è guidati dalla nostra interpretazione dei segni *(semiosi*) ben al di là delle poche *affezioni quantitative* isolate dagli apparati di misura.

Uno dei padri dell'Intelligenza Artificiale (*IA*), Herbert Simon, aveva ideato un programma di computer, chiamato *BACON*, che, alimentato con i dati astronomici noti alla fine del 1500, estraeva le tre leggi di Keplero. Il successo sembrava fare dell'*IA* la spiegazione dei processi mentali. In effetti, BACON funziona solo perché si è nell'ambito di un codice unico. Appena *K>0*, cioè si perde l'informazione dei dati iniziali entro un tempo *1/K*, occorre rimpiazzare l'informazione mancante con dati ulteriori. Ci sono due modi alternativi per ovviare.

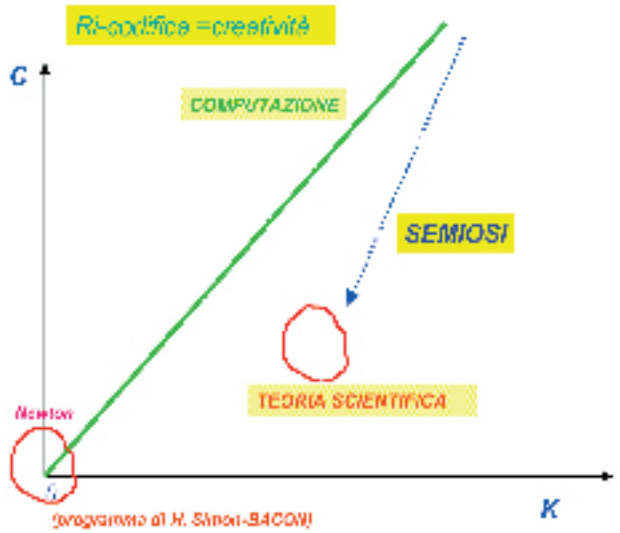


Figura 6 - Diagramma C-K. Confronto fra i modi di procedere di un computer e di un essere umano. Restando dentro un unico codice, come fa il computer, C cresce con K. Invece lo scienziato è opportunista, e cerca il codice migliore per ridurre C. Ipotizzando nuove variabili che controllano il caos riducendo K, si introduce una teoria efficace che trascura le variabili veloci e descrive solo le variabili lente.

1. *Approccio riduzionistico*: si mantiene il piacere estetico delle leggi semplici (Keplero, Newton), ma trattando di $N > 2$ oggetti, si aumenta C proporzionalmente a K, cioè occorre aumentare massicciamente il numero di cifre con cui si assegnano le condizioni iniziali (aumentando sia la risoluzione dell'apparato di misura, sia la memoria che immagazzina i dati), per ovviare alla erosione di informazione dovuta a $K > 0$, oppure occorre ri-aggiornare le condizioni iniziali con nuove misure, come si fa con le previsioni meteorologiche, con i modelli finanziari, ecc. 2. *Teoria efficace*: si utilizza la perdita di informazione per introdurre nuove variabili legate da nuove leggi, per contenere la crescita di C, cioè si formula una nuova teoria, come è avvenuto per la *termodinamica.*

Se associamo la creatività a questa seconda procedura, allora dobbiamo prendere atto che essa è figlia di $K > 0$; questo spiega il sotto-titolo di questo lavoro: *un elogio dell'oblio.*[1]

All'estremo di alti C e K, la dinamica delle singole molecole di un gas in equilibrio (tempi caratteristici: picosecondi) è rimpiazzata da una descrizione a poche variabili collettive, cioè dalla termodinamica (scale di tempi rilevanti: dal microsecondo in su).

Dal punto di vista della pratica scientifica, diciamo «complesse» le situazioni per cui non abbiamo ancora a disposizione una descrizione soddisfacente, esempio tipico: la *mente umana.* L'*economia* implica l'interazione fra un numero grande di agenti umani, quindi dovrebbe essere ancor più complessa, ma i modelli economici correnti sono più soddisfacenti dei correnti modelli cognitivi.

6. Il Teorema di Bayes - informazione e significato

Thomas Bayes amava giocare d'azzardo; pertanto elaborò una procedura per fare buon uso delle esperienze pregresse. In formula, il Teorema di Bayes è così espresso[2]:

$$\text{prob.(ipotesi} \mid \text{dato)} = \text{prob. (dato} \mid \text{ipotesi)} \times \text{prob.(ipotesi)} / \text{prob.(dato)}$$

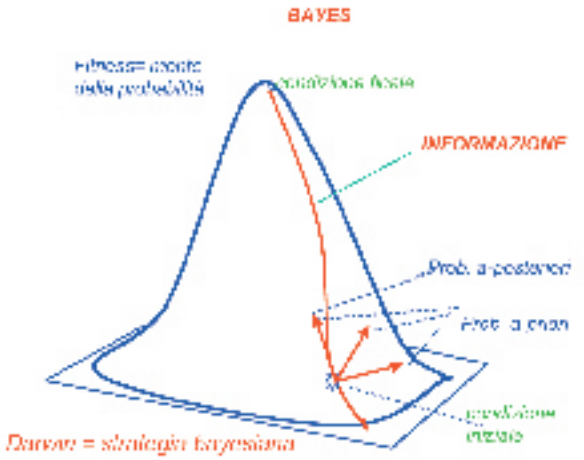


Figura 7 - Teorema di Bayes. Costruzione di modelli scientifici vieppiù adeguati agli esperimenti, per applicazione successiva del Teorema di Bayes. La procedura è una scalata del monte della probabilità. Ad ogni punto sulla curva che porta al picco, il contenuto di informazione dipende dal valore locale di probabilità. Si noti che la strategia darwiniana di selezionare la massima fitness dopo una mutazione è una implementazione sequenziale del teorema di Bayes.

Spieghiamone il significato. Il Teorema dice che la probabilità di una ipotesi, condizionata da (è questo il significato della barra |) un dato osservato, e che chiameremo probabilità *a posteriori*, è data dal prodotto della probabilità, che chiameremo *il modello,* che si verifichi il dato a partire da (condizionato da) una certa ipotesi per la probabilità dell'ipotesi (probabilità *a priori*: ci siamo inventati un pacchetto di possibili ipotesi a ciascuna delle quali annettiamo una probabilità a priori), diviso la probabilità di accadimento del dato sperimentalmente verificato (dobbiamo ripetere la misura su tutta una classe di dati per riuscire ad assegnare quest'ultima). Come mostrato in fig.7, se partiamo dalla condizione iniziale e formuliamo un ventaglio di ipotesi, il verificarsi di un certo dato ci farà scegliere quella ipotesi che massimizza l'espressione su riportata. Successive applicazioni del teorema equivalgono a una ascesa di un monte delle probabilità secondo la direzione di massima pendenza, finché si raggiunge il massimo.

La strategia evolutiva postulata da Darwin, come sequenze di *mutazione* e *selezione* del mutante che meglio si adatta all'ambiente (cioè, che ottimizza la *fitness*), è una applicazione del Teorema di Bayes, chiamando *fitness* il monte di probabilità da scalare. Questa procedura può essere formalizzata in un programma. Si può realizzare un *sistema esperto*, che elabori dati sperimentali estraendone una diagnosi; sarebbe utile in medicina, gestione aziendale,ecc.

La procedura è a-semiotica, cioè è agnostica rispetto ai significati; alcuni cultori di *IA* ne hanno fatto un paradigma del modo di operare della nostra mente. C'è però un

limite di fondo che blocca l'automatismo. Una volta raggiunto il picco, il programma si ferma; qualunque ulteriore insistenza sarebbe una catastrofica caduta in basso. Forse è quel che accade nelle estinzioni di massa di specie biologiche, senza bisogno di invocare il meteorite che estingue i dinosauri.

Prendere atto che esistono altri monti (fig.8) e che si può ricominciare la scalata altrove è un atto di creatività, corrispondente a una comprensione dei segni del mondo (semiosi) guidata da tutto il retroterra culturale e umano dello scienziato: operazione non delegabile a un computer. Quando si siano esaurite le possibilità legate alla scalata di un picco, il sistema esperto non sa come continuare, invece l'agente umano può intraprendere un'altra scalata, facendo un salto discontinuo rispetto alla procedura graduale prevista dalla formula di Bayes.

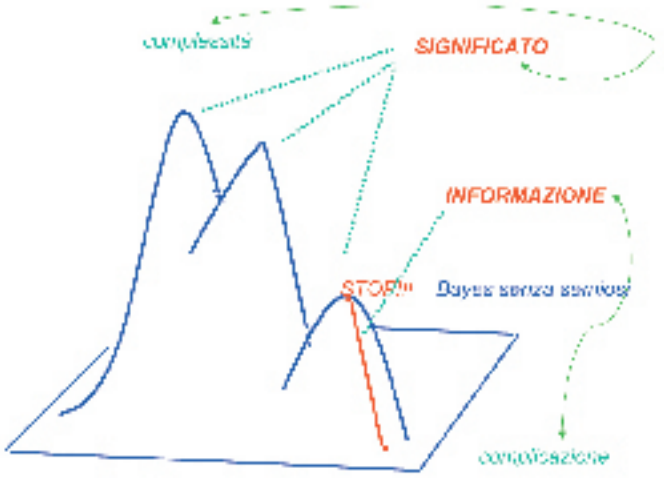


Figura 8 - Complessità semantica. Spazio delle probabilità con più massimi. L'ascesa verso un picco può essere automatizzata da un programma di scalata secondo il massimo gradiente. Una volta raggiunto il picco, il programma si ferma. Al significato corrisponde l'esistenza di più picchi.

Chiameremo *significato* il fatto che esistano più picchi. Esso va ben al di là dell'*informazione*, che nella definizione di Shannon quantifica l'evoluzione della probabilità nella salita su un versante. Possiamo identificare la complessità semantica con il numero di picchi, cioè di strategie di Bayes distinte che possiamo intraprendere; si tratta di un concetto non ben definito, in quanto il paesaggio a molti picchi varia man mano che varia il nostro grado di comprensione. La fig. 8 è puramente indicativa: in genere, operiamo in uno spazio con molte più di 2 dimensioni, e abbiamo molti più di 3 picchi. Inoltre, la nostra interazione intenzionale col mondo entro cui siamo immersi altera il numero di picchi.

7. Da complicazione a complessità

Abbiamo visto che in un universo chiuso, dove tutti gli oggetti sono già assegnati, non si ha complessità ma complicazione, nel senso che: (1) ogni problema è puramente sintattico, cioè implica la scelta e connessione di simboli già fissati, (2) le risorse necessarie

per risolvere il problema possono crescere in modo patologico con il numero di dati del problema. Se invece siamo aperti all'irruzione di elementi nuovi, non preventivati nel costruire un repertorio cognitivo, non possiamo ovviamente pretendere da demiurghi di conoscere il nostro mondo e l'altro (che d'ora in poi chiameremo *l'ambiente*), ma dobbiamo limitarci a registrare quali modifiche l'interazione con l'ambiente induca nel nostro mondo.

Il primo approccio, che possiamo chiamare statistico, consiste nel ritenere l'ambiente come un disturbo (*noise*) su cui siamo ignoranti; esprimeremo questa nostra ignoranza prendendolo a massima entropia, cioè all'equilibrio termico, e caratterizzandolo con una temperatura. All'interno del nostro sistema (quello su cui possiamo fare misure) l'accoppiamento con l'ambiente a una certa temperatura (che diremo bagno termico) provoca due conseguenze: *dissipazione,* cioè uno smorzamento della velocità iniziale; e *fluttuazione,* cioè oscillazioni permanenti a media nulla attorno al punto raggiunto di velocità nulla. Su questa falsariga si è costituita una strategia di Intelligenza Artificiale che possiamo chiamare *oracolo* (*oracle machine*). La macchina di Turing deterministica svolge solo operazioni sintattiche all'interno di un codice. Essa pertanto è limitata dal Teorema di Gödel che pone un limite alla procedura deduttiva a partire da un corpo di assiomi; la versione per macchina del Teorema di Gödel è[3] che un computer equipaggiato con un programma definito non sa quando fermarsi per un generico pacchetto di ingresso. Supponiamo di aggiungere a una macchina di Turing un *disturbo* sufficiente a «saltare» su un programma diverso, cioè a cambiare «alfabeto» (tale è in effetti il passare dall'analisi di un sistema dinamico a N dimensioni a un sistema a N'=N+m dimensioni): In N+m potrebbe non incontrasi la difficoltà che c'era in N. ciò permette di fuoriuscire dal limite di Gödel-Turing. Questa strategia di «immersione» di un problema in spazi a dimensioni differenti è la base dei calcoli «euristici» che guadagnano in ambito di applicabilità a scapito della accuratezza,che vien garantita solo entro un margine di errore; questo trucco di sporcare un calcolo deterministico con un disturbo permette di esplorare situazioni altrimenti non accessibili (le cosiddette *macchine di Boltzmann*).

La TM (macchina di Turing) è individuata da: $M=<\Sigma,K,\delta>$ dove Σ è l'alfabeto di simboli, K l'insieme di stati, δ la funzione di transizione., la indeterministic TM «ha più di uno stato» ma sempre in numero finito e che la TM«probabilistica» permette «scelte random in un insieme finito di alternative» [4]. Invece l'aggiunta di m ulteriori dimensioni alla dinamica significa nuove equazioni del moto: questo porta la TM in una situazione nuova

$$M=<\Sigma^*,K^*,\delta^*> ,$$

la costringe cioè a un'altra sintassi. Ogni sintassi sarà di un numero finito di Σ,K,δ ,ma i salti di sintassi NON fanno parte del gioco.

Il secondo approccio consiste nel riconoscere la struttura ricca dell'ambiente e nel porci il problema semantico: possiamo dire cose significative del mondo esterno

attraverso le nostre acquisizioni percettive e cognitive? Cioè, possiamo fare salti «guidati» invece che casuali, come nella euristica su accennata? È questo il problema cruciale della creatività scientifica che abbiamo simbolizzato in fig.8. Orbene,la risposta è in fig. 2: per controllare il caos,dobbiamo aggiungere ulteriori gradi di libertà (le m dimensioni di cui sopra) ed m non è definito,perché un agente «semiotico» può decidere di compensare la perdita di informazione caotica in modo più o meno soddisfacente.

Diremo –come è oggi affermato dai cosiddetti «biosemiotici» – che qualunque vivente è semiotico perché fa operazioni di tipo fig. 2 (si noti, non semplicemente «omeostatiche» come nella fisiologia di un tempo, ma - lasciatemi introdurre un nuovo termine- «omeodinamiche») cioè si costruisce un suo mondo a prospettive stabili e,per far questo, deve alterare i gradi di libertà del sistema «se-stesso + ambiente», a differenza di un non-vivente, per cui si può fissare a-priori lo spazio dinamico entro cui evolve.

Elenchiamo qui di seguito quattro esempi di come «scienza creativa» voglia dire «introduzione di un nuovo codice» (*NON c'è programma di tipo BACON che possa far questo!)* e tre sfide aperte per la ricerca di questi anni.

Da complicazione a complessità: quattro teorie recenti

1. elettricità – magnetismo – ottica	*equazioni elettromagnetismo (Maxwell)*
2. tavola di Mendeleev	*atomo quantistico (Bohr, Pauli)*
3. zoo di 100 particelle elementari	*quarks (M. Gell Mann)*
4. leggi di scala in transizioni di fase	*gruppo di ri-normalizzazione (K.Wilson)*

Da complicazione a complessità: tre sfide aperte

1. leggi di potenza in fratture, mercati finanziari, DNA, reti metaboliche	*?????? (vita, società)*
2. incompatibilità fra QFT e GR (QFT=teorie quantistiche dei campi; GR = relatività generale)	*?????? (cosmologia)*
3. dinamica neuroni, glia, chimica neurotrasmettitori	*?????? (mente, coscienza)*

8. L'interpretazione dei segni – circolo e spirale ermeneutica

Nella dinamica cognitiva, il *segno* è qualsiasi cosa possa stimolare il controllo del caos di fig.2, portando un agente a una percezione o cognizione coerente (nel caso percettivo l'input è sensorio, nel caso cognitivo l'input è concettuale: una frase linguistica, il

risultato di una misurazione, ecc). I filosofi, a partire dall'antichità , hanno elaborato dottrine dei segni in modo più o meno implicito. Nell'epoca moderna, a partire dal sec.XVII con il *Tractatus de signis* di Giovanni da San Tommaso (Poinsot) e a cavallo fra XIX e XX sec, con Peirce ,il problema del segno è stato messo a fuoco. Per Peirce, affinché il segno serva deve entrare in relazione con un *oggetto*, e produrre nella mente del soggetto un *interpretante*: influenza triadica NON risolvibile in azione tra coppie. Questo processo interpretativo viene chiamato «semiosi».

Punto cruciale per noi: uno schema adattivo, con *feedback*, quale quello adombrato in fig.2, attinge a un repertorio pre-costituito oppure si arricchisce di novità? Risposta: lo spazio semantico non è precostituito ma si rinnova ad ogni esperienza. Il gioco dinamico fra *bottom-up* e *top-down* nel cervello fa sì che a pari stimolo esterno non corrisponda la stessa sequenza di *spikes* (cioè lo stesso treno di impulsi neuronali); la sequenza pertanto non è come il codice a barre dei prodotti al negozio, dato *a priori*; e non ci sarà un futuro «grande inquisitore», cioè un *chip* impiantato nel cervello che possa leggere nel nostro privato e decodificare i nostri pensieri.

Illustriamo con due esempi recenti dalla neuroscienza. Inserendo elettrodi nei neuroni olfattivi di una locusta (G. Laurent, Caltech), si è verificato che la sequenza temporale di *spikes* che codifica un certo odore non varia in successive presentazioni dello stesso oggetto odoroso all'animale: questo sembra avere un repertorio limitato, che non evolve. Invece nel caso di un coniglio (W. Freeman, Berkeley) la successiva esposizione dell'animale allo stesso odore stimola distribuzioni di *spikes* differenti. Il coniglio si dirige in ogni caso verso l'oggetto odoroso (si tratta di una banana), ma la seconda volta aggiunge un elemento cognitivo in più: come a dire che si rende conto che si tratta di qualcosa che ha già sperimentato! Cartesio considerava tutti gli animali non umani come solo *res extensa*; forse, se avesse saputo di questi due esperimenti, avrebbe avuto qualche dubbio sul coniglio.

Se rappresentiamo i vari significati come punti di uno spazio semantico (fig.10), per la locusta – come per un robot – parleremo di *circolo ermeneutico*, cioè di connessione (linguistica o percettiva) fra elementi pre-assegnati e invariabili a cui si ritorna ineluttabilmente, per ricco che sia il repertorio accumulato. Invece per un coniglio (e a fortiori per un essere umano) parleremo di *spirale ermeneutica*, cioè di crescita cognitiva con l'esperienza. Si tratta di un programma *non finitistico*, in quanto non siamo confinati entro un insieme a numero di elementi finito: il ripresentarsi di un'esperienza non è mai uno stereotipo come per la locusta, ma ritorna arricchito dal nostro vissuto; come ben sappiamo quando rileggiamo un poeta o riascoltiamo un pezzo di musica a noi caro dopo molto tempo.

Il fatto che la spirale sia innescata da stimoli significativi (quelli per intenderci che stimolano gruppi di neuroni a organizzarsi in una rete sincronizzata) dà un solido fondamento realistico al nostro rapporto col mondo, escludendo il sospetto di relativismo.

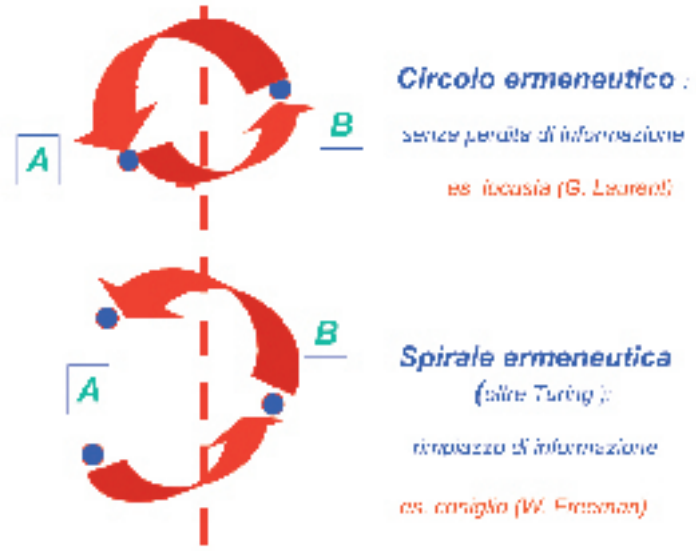


Figura 9 - Circolo ermeneutico e spirale ermeneutica. Il primo concetto, usato nelle scienze umane da H. G. Gadamer (Verità e metodo,1960), riceve qui una formulazione precisa. Supponiamo di operare in uno spazio semantico finito.

Scelta una connotazione A1 per la parola A, un opportuno connettore mappa su un particolare significato di B. L'operazione inversa riporta ad A1, per cui si parla di *circolo*. Se ora i significati non sono congelati a priori, ma evolvono nella interazione con l'agente cognitivo, il ritorno avverrà su A2 differente da A1, in quanto nel frattempo l'agente ha vissuto una nuova esperienza: dobbiamo rappresentare i significati con un insieme *non finito* ma suscettibile di essere accresciuto nel tempo; la sequenza di operazioni cognitive si presenta ora come una *spirale ermeneutica*.

Note

[1] Un'analisi dettagliata di questa formulazione è stata presentata in F. T. Arecchi, «Complexity and emergence of meaning: toward a semiophysics», in *Complexity and Emergence*, a cura di E. Agazzi e L. Montecucco, World Scientific, Singapore, 2002, pp. 115-146.

[2] Rev. T. Bayes, «An essay toward solving a problem in the doctrine of chances», *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 53 (1763), pp. 370-418.

[3] A. Turing, «On Computable Numbers With an Application to the Entscheidungsproblem», *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2/42 (1936), pp 230-265.

[4] In conformità al *Dictionary of Algorithms and Data Structures* (a cura di Paul E Black, US National Institute of Standards and Technologies, 2006).

BIBLIOGRAFIA

Dato il carattere di questa presentazione, non è sembrato opportuno appesantirla con un apparato bibliografico. Sui vari aspetti della complessità, rimando ai lavori elencati sulla mia homepage: www.inoa.it/home/arecchi e, in particolare, a

F. T. Arecchi, A. Farini, *Lexicon of Complexity,* Studio Editoriale Fiorentino, Firenze 1996.

F. T. Arecchi, *Caos e Complessità nel Vivente,* IUSS Press, Pavia, 2004.

F. T. Arecchi, *Cognitive Dynamics: Complexity and Creativity*, DICE (in corso di pubblicazione).

La psicologia del sonno

Piero Salzarulo

Dipartimento di Psicologia, Università di Firenze

1. La psicologia del sonno: ricerche sperimentali

La psicologia si è relativamente poco interessata allo studio sperimentale dei processi mentali relativi al sonno sino alla seconda metà del XIX secolo, quando Alfred Maury e Hervey de Saint Denis hanno proceduto alla raccolta sistematica della loro produzione onirica, applicando (talvolta volutamente) stimoli specifici. Pochi anni dopo, Freud sviluppò un approccio sistematico allo studio del sogno inserito in una concezione globale del funzionamento psichico. Studi di tipo sperimentale su soggetti altri che se stessi, con risvegli provocati nel corso della notte, sono stati effettuati sia in Europa che negli Stati Uniti (vedi [7]).

2. Fisiologia del sonno umano

Quella che è stata chiamata la moderna psicofisiologia del sonno e del sogno si è sviluppata in particolare dopo la scoperta del sonno REM fatta nel 1953 da Aserinsky e Kleitman [1]. Infatti, per capire in quali direzioni e con quali risultati si sia sviluppato questo filone di ricerca, bisogna soffermarsi sulle caratteristiche fisiologiche del sonno.

Le informazioni sulle caratteristiche del sonno da utilizzarsi anche per gli studi sperimentali di psicologia del sonno si raccolgono attraverso registrazioni poligrafiche. Vengono cioè acquisite in continuo e simultaneamente le caratteristiche dell'attività cerebrale, dell'attività muscolare, del respiro, dell'attività cardiaca e dell'attività oculare. Per fare ciò è necessario disporre di apparecchiature idonee e di locali attrezzati. Tutto si svolge quindi in un *setting* particolare.

Ognuna di queste attività contribuisce a definire le caratteristiche del funzionamento del cervello e dell'organismo. Che nel sonno ci sia attività cerebrale e che questa attività non sia identica nel corso della notte lo si sapeva già da tempo; alla fine degli anni '30, Loomis e collaboratori [3] avevano descritto varie fasi del sonno caratterizzate da attività cerebrale diversificata.

Solo dopo la scoperta di Aserinsky e Kleitman [1] si è capito che esistevano due tipi di sonno diversi per caratteristiche non solo dell'attività cerebrale ma anche di altre funzioni dell'organismo. È stato infatti identificato un tipo di sonno in cui si presentano simultaneamente movimenti oculari rapidi (R*apid* E*ye* M*ovements*, da cui il nome di «sonno REM»), atonia dei muscoli antigravitari e attività elettroencefalografica caratterizzata da frequenze rapide e di basso voltaggio, simile a quella della veglia.

L'altro tipo di sonno, nel quale sono assenti i movimenti oculari, il tono muscolare

è mantenuto e l'attività elettroencefalografica è caratterizzata da frequenze più ampie e lente rispetto alla veglia, viene definito «sonno NREM» (= non-REM); il sonno NREM può essere suddiviso in quattro stadi in funzione della presenza di particolari configurazioni elettroencefalografiche e della proporzione di onde lente presenti sul tracciato. Si è visto anche che questi due tipi di sonno appaiono in sequenza più volte nel corso dell'episodio formando dei cicli (vedi fig. 1): un episodio di sonno è quindi una costruzione altamente organizzata alla quale contribuiscono molteplici funzioni dell'organismo coordinate tra di loro[1].

Di questa struttura bisogna tener conto per affrontare lo studio sperimentale della psicologia del sonno ed in particolare della memoria e del sogno.

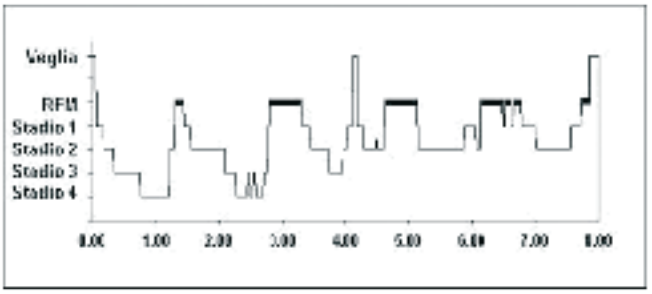


Figura 1 - Profilo di un episodio di sonno (ipnogramma).
Un ciclo di sonno è costituito da una fase di sonno NREM seguita da una di sonno REM.

3. Memoria e sonno

Il ruolo del sonno nei processi di memoria[2], già intuito da filosofi e clinici, è stato dimostrato sperimentalmente da Jenkins e Dallenbach nel 1924 [2]. Dopo aver imparato a memoria una lista di sillabe senza senso, i soggetti dell'esperimento trascorrevano un certo periodo di tempo dormendo oppure restando svegli prima di essere nuovamente interrogati sul materiale appreso. Quando questo periodo era trascorso in sonno, il numero di sillabe ricordate era superiore a quello ottenuto dopo un periodo di veglia di analoga durata.

Questo effetto, definito «effetto sonno», è stato dapprima attribuito alla riduzione delle interferenze che disturbano il ricordo del materiale appreso. Successivamente sono state prese in considerazione e valutate altre interpretazioni dell'«effetto sonno», chiamando in causa altri processi di memoria quali il decadimento e il consolidamento.

Gli studi sperimentali successivi al 1953 hanno messo in evidenza prima il ruolo del sonno REM rispetto al sonno NREM. Esperimenti più recenti hanno mostrato l'importanza della cooperazione tra i due tipi di sonno (REM e NREM). Un episodio di sonno costituito da una sequenza regolare di cicli NREM-REM è più favorevole alla ritenzione in memoria di materiale verbale rispetto ad un sonno disorganizzato. In altri termini un «buon» sonno permette di ricordare meglio rispetto ad un «cattivo» sonno.

Le ricerche attuali cercano di valutare anche gli effetti delle modificazioni del sonno sulle *performances* cognitive della veglia successiva al sonno, sia immediatamente dopo (inerzia del sonno) che nel corso della giornata. Queste ricerche si avvalgono non solo

delle tecniche di indagine dell'attività del sistema nervoso centrale ma anche delle elaborazioni teoriche riguardanti i processi cognitivi.

4. Lo studio sperimentale del sogno

Approcci sistematici, e quindi riproducibili con le stesse metodiche (in altri termini «sperimentali»), allo studio del sogno sono stati effettuati alla fine dell'Ottocento e prima metà del Novecento, con risvegli provocati e raccolta del materiale onirico.

Dopo il 1953, il risveglio provocato viene effettuato in laboratorio, quindi come abbiamo visto in un *setting* particolare ed uguale per tutti, in relazione con il tipo di sonno individuato attraverso la registrazione poligrafica (vedi fig. 2).

I numerosissimi studi che ne sono seguiti[3] hanno mostrato che la frequenza di ricordo del sogno è maggiore in sonno REM rispetto a NREM, quale che sia il tipo di richiesta che viene fatta al soggetto al momento del risveglio, ma che anche in sonno NREM si può ottenere un ricordo affidabile di sogno che testimonia della possibilità di sognare anche in questo tipo di sonno. La differenza risiede soprattutto nella maggiore capacità di consolidazione e maggiore accessibilità al recupero dopo risveglio in sonno REM.

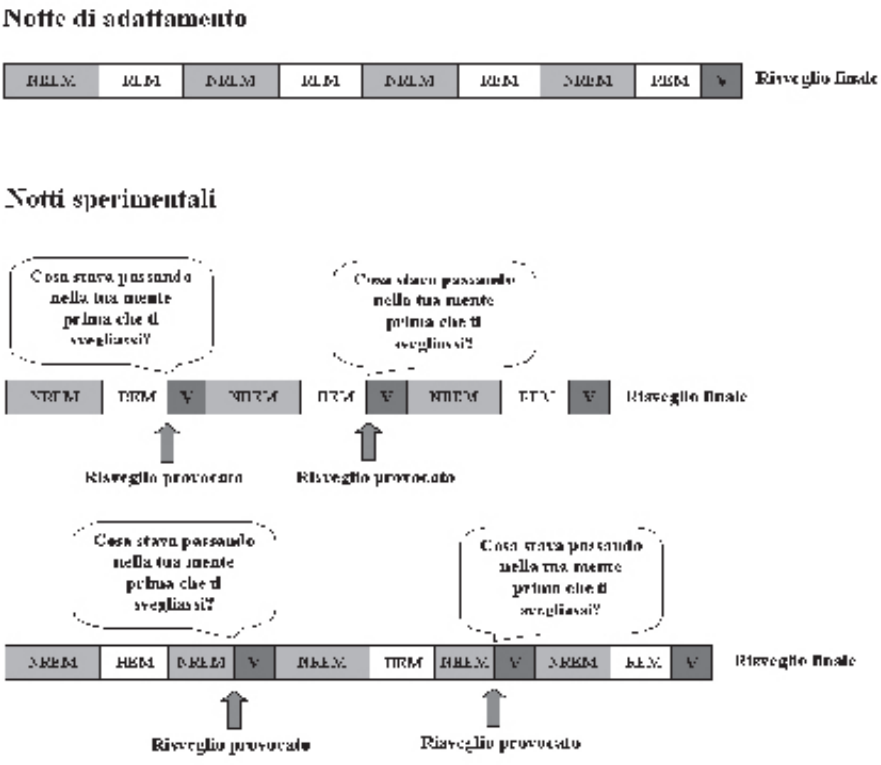


Figura 2 - Disegno sperimentale con risvegli provocati nei due tipi di sonno e in diversi momenti dell'episodio (da [7]*).*

Le analisi psicolinguistiche hanno potuto descrivere il modo con il quale si costruisce il racconto di un'esperienza onirica e fornire indicazioni sui processi mnestici

implicati[4], offrendo così un esempio interessante di collaborazione e dialogo tra discipline diverse.

Quindi si può sognare durante tutto l'episodio di sonno, con maggiore facilità a recuperare il contenuto in sonno REM e nella seconda metà della notte. Quest'ultimo risultato mette in evidenza il ruolo dei ritmi biologici, e la loro interazione con il tipo di sonno, nei processi di memorizzazione del materiale onirico.

L'importanza accordata a questo quadro di riferimento deve accompagnarsi con l'uso attento delle metodiche sperimentali e delle acquisizioni recenti nello studio dei processi cognitivi; infatti, mentre approcci quali quello psicoanalitico ci informano sul *significato* del sogno, l'approccio cognitivistico ci aiuta a capire *come si costruisce* e *come si ricorda* un sogno.

Note

[1] Per ulteriori dettagli, vedi [5].

[2] Vedi [7].

[3] Una rassegna di Nielsen, pubblicata nel 2004, [4], ne cita 38; si veda il volume di Salzarulo e Ficca, [7], per un'analisi dettagliata.

[4] Vedi [6].

BIBLIOGRAFIA

[1] Aserinsky, E. e Kleitman, N., Regularly occuring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep. *Science*, 118, 1953, pp. 273-274,.

[2] Jenkins J. K. e Dallenbach K. M., Obliviscence during sleep and waking. *American Journal of Psychology*, 35, 1924, pp. 605-612.

[3] Loomis, A. L., Harvey, E. N. e Hobart. G.A., Cerebral states during sleep as studied by human brain potentials. *Journal of experimental psychology*, 21, 1937, pp 127-144,.

[4] Nielsen, T. A., Chronobiological features of dream production. *Sleep Medicine Reviews*, 8, 2004, pp. 403–424.

[5] Salzarulo, P., *Come dormiamo*, Giunti, Firenze 2007.

[6] Salzarulo, P. e Cipolli C., Linguistic organisation and cognitive implications in REM and NREM sleep related reports. *Perceptual and Motor Skills*, 49, 1979, pp. 767-777.

[7] Salzarulo, P. e Ficca, G., *La mente nel sonno*, Laterza, Roma-Bari 2004.

La Coscienza: tra Filosofia e Neuroscienze

Giacomo Romano

Dipartimento di Filosofia e Scienze Sociali, Università di Siena

1. La coscienza nella storia del pensiero occidentale

Fino al XVI secolo, agli inizi cioè della moderna filosofia occidentale, i processi mentali erano spiegati utilizzando termini come 'anima', 'spirito', 'soffio vitale', oggi desueti sia dal punto di vista filosofico che, a maggior ragione, dal punto di vista scientifico, e che certamente non hanno contribuito al chiarimento del mentale.

Con l'opera di Cartesio (1596-1650), che di fatto ha segnato l'inizio della filosofia moderna, la storia del pensiero compie una vera e propria svolta, un radicale cambiamento di prospettiva, che invece pone a fondamento stesso della riflessione filosofica un principio mentale. Cartesio infatti identifica in un fatto mentale la base metafisica di ogni nostra conoscenza e certezza. L'arcinota espressione cartesiana «*cogito ergo sum*» («*penso, dunque sono*») assurge infatti a principio di auto-evidenza del pensiero, rappresenta la certezza che un soggetto pensante ha di sé stesso in quanto tale, in quanto impegnato nell'attività del pensiero. E così Cartesio, nei *Principi della Filosofia* [4, I, 9], ci introduce a questo concetto: «Con il nome di pensiero intendo tutte quelle cose che avvengono in noi con coscienza, *in quanto ne abbiamo coscienza*. Così non solo intendere, volere, immaginare, ma anche sentire è qui lo stesso che pensare.».

Ma che cosa intende Cartesio per «coscienza»? Secondo le interpretazioni più accreditate degli scritti cartesiani, per il filosofo francese la coscienza si identifica con il flusso completo e irriducibile dell'esperienza spirituale introspettiva umana, in ogni sua manifestazione. La sfera della coscienza dunque è circoscritta alla dimensione del soggetto, dell' *io*-sostanza pensante, che si presenta a sé stesso con la forza dell'auto-evidenza ed è fonte prima di evidenza per ogni conoscenza valida.

La concezione della «coscienza» intesa come unitario flusso di pensiero immediatamente presente a sé stesso è di fatto assorbita dalla tradizione filosofica occidentale e fondamentalmente non è messa in discussione fino ai nostri tempi recenti. Anche John Locke (1632-1704), pur ponendosi con atteggiamento critico nei confronti di Cartesio, condivide il concetto cartesiano di «coscienza»: «In ogni atto di sensazione, di ragionamento o di pensiero siamo consapevoli di fronte a noi stessi del nostro essere, e in proposito raggiungiamo un più alto grado di certezza.» [6; IV, 9, 3].

Dunque, a partire da Cartesio e nei due secoli successivi la coscienza si deve identificare in una forma di *percezione di sé*: un principio che ha guidato gli studi sul mentale di approcci anche molto diversi, come per esempio l'*associazionismo* (di Hume,

Mill, Stuart Mill), per cui i pensieri (*coscienti*, per l'appunto) di una persona interagiscono in base a principi combinatori quasi meccanici, oppure come la *fenomenologia*, che si propone di descrivere in modo rigoroso e scientifico le varie manifestazioni della realtà nella coscienza (Husserl, Merleau-Ponty, ecc.). Insomma, la «coscienza» come *coscienza di sé*, come principio unico all'origine delle attività di un *agente cognitivo* è il concetto che domina lo studio dei processi mentali fino all'alba della psicologia scientifica (con Wundt, von Helmholtz, James, Titchener).

Nel periodo che va dall'inizio della filosofia occidentale fino al ventesimo secolo le uniche eccezioni a questa concezione dominante del concetto di «coscienza» si trovano prima in una parte della filosofia di Leibniz (nella teoria delle cosiddette *piccole percezioni*, in cui si fa un accenno –a dire la verità niente affatto perspicuo-, all'idea che le monadi, unità ultime da cui è costituito il mondo, possano avere delle percezioni che per la loro primitività e opacità non sono effettivamente consapevoli: ma, come ho già ricordato, sulla *teoria delle piccole percezioni* non c'è grande chiarezza), poi nell'opera (monumentale) di Sigmund Freud, con la sua *teoria dell'inconscio* (1900).

Freud non è stato il primo autore a riconoscere forme del pensiero umano alternative a quelle coscienti; ma è stato sicuramente il primo a mettere in discussione seriamente il modello unitario della coscienza che si era affermato con il Cartesianismo. Le idee e i processi mentali inconsci, infatti, per Freud non sono solamente alcuni aspetti marginali della vita cognitiva umana, che magari si rivelano sporadicamente e principalmente in alcuni casi accertati di psicopatologie, ma sono la struttura portante del pensiero. L'approccio freudiano, fondato su un ampio spettro interdisciplinare che ebbe esito in una originale e feconda teoria del mentale, si distinse per il suo impatto innovativo, ma fu presto messo in crisi dagli sviluppi impressionanti della biologia e della psicologia nei primi decenni del '900: questi mostrarono che molti dei presupposti teorici su cui Freud si appoggiava non erano scientificamente plausibili e quindi nel complesso la sua dottrina non era scientificamente accettabile. E la scarsa credibilità scientifica di cui godevano le idee freudiane ha anche compromesso l'ipotesi che l'approccio di Freud al mentale potesse avere nell'ambito di una prospettiva scientifica e/o rigorosa per lo studio della coscienza un'influenza significativa. Quindi, per quanto innovativo e nonostante l'indubbio successo di molti suoi aspetti, il pensiero di Freud era destinato a rimanere, nella sua originalità, relativamente isolato, e non contribuì agli sviluppi di una analisi scientificamente rigorosa (secondo i canoni moderni) della coscienza.

Sempre nei primi decenni del XX secolo, del resto, le speculazioni della filosofia europea del Continente avevano di fatto recuperato e rafforzato la concezione cartesiana della coscienza, principalmente in seguito alla diffusione del pensiero di Edmund Husserl (1859-1938), che al *cogito* cartesiano si richiamava: la fenomenologia. Successivamente l'eredità di Husserl fu trasformata da sviluppi filosofici che ne hanno marcato ancor di più il profilo soggettivistico, seppure in modo non sempre esplicito. Contemporaneamente, la direzione che stava assumendo la psicologia scientifica induceva progressivamente a prendere le distanze dalla coscienza come fenomeno

mentale e addirittura a negarne una dimensione sia epistemologica che ontologica. Il periodo che va dal primo decennio agli anni '50 del secolo scorso, infatti, coincide con l'incontrastato dominio di quella corrente della psicologia nota come *Comportamentismo*, che, prendendo atto della impossibilità di studiare in maniera oggettiva la vita della mente in generale e in particolare la coscienza, in quanto inosservabile, aveva definito l'oggetto dello studio della psicologia, intesa come disciplina scientifica, solamente nella dimensione osservabile della mente, vale a dire il comportamento. La coscienza dunque scompare dall'orizzonte degli studi psicologici e della filosofia che adottava un metodo scientifico durante gli anni del Comportamentismo; e anche successivamente, quando il Comportamentismo fu sostituito dalle Scienze Cognitive ('50-'80), che certamente avevano riservato una maggiore attenzione ai processi cognitivi e mentali interni in genere, la coscienza non è mai stata presa in considerazione come serio oggetto di studio; forse sempre a causa delle scarse possibilità di poter trovare un qualche riscontro empirico oggettivo a considerazioni e riflessioni su un fenomeno psicologico molto sfuggente, secondo dei criteri scientifici comunemente accettati. Non a caso la coscienza tornerà di nuovo in auge, nell'interesse sia di scienziati che di filosofi, solamente negli anni '80, quando grazie ai progressi e agli sviluppi delle tecniche funzionali all'osservazione dei fenomeni cerebrali diventa concreta la possibilità di individuare, anche seppure grossolanamente, una associazione tra la dimensione neurologica e quella psicologica, entrambi corrispondenti alle attività cognitive dell'essere umano.

2. La varietà della coscienza

Con l'ultimo ventennio del XX secolo la coscienza è divenuta oggetto di interesse per un'ampia area di ricerca interdisciplinare e ha polarizzato su di sé l'attenzione di moltissimi studiosi, provenienti da aree scientifiche e disciplinari anche molto diverse (si prenda ad esempio il fisico Roger Penrose); ma soprattutto per la filosofia, e in particolare per la filosofia di lingua anglofona, è diventata il centro gravitazionale di una nuova e originale dimensione speculativa molto approfondita, per quanto in prospettive differenti.

Probabilmente gli studi sulla coscienza godono di un successo notevole perché si è cominciato a comprendere soltanto nelle ultime due o tre decadi quanto questa sia un oggetto di ricerca tanto complesso e sfuggente, e quindi quanto sia un tema di ricerca stimolante; ricordando il commento acuto di un famoso filosofo americano, John Searle [9, pp. 155-178], è solo negli ultimi tempi che si è cominciato a riconoscere nella coscienza non più esclusivamente un mistero, ma anche un problema.

Che la coscienza sia un problema particolarmente spinoso forse lo si può notare da un'osservazione banale ma drammaticamente vera: sebbene io stia già discorrendo da un paio di pagine sul concetto di «coscienza» come è stato inteso da alcuni filosofi in certi periodi storici, ancora non ne ho data alcuna ragionevole caratterizzazione né tanto meno una adeguata definizione diversa e più esauriente di quelle che si possono ricavare dalle pagine di Cartesio o Locke.

Fortunatamente con l'ultimo scorcio del XX secolo nella comunità scientifica e filosofica che se ne occupa si è fatta un po' di chiarezza ulteriore, rispetto all'idea cartesiana, almeno sui *modi* di interpretare la coscienza. Ci sono infatti diverse possibilità di intendere il significato dell'espressione «*P* è cosciente», indicando con '*P*' una certa persona, dotata di normali capacità fisiche e mentali; grossolanamente se ne possono distinguere almeno tre, di queste generiche possibilità.

Affermare che «P è cosciente» può significare o 1) che P è in uno stato di veglia opposto allo stato in cui P dorme, o è svenuto, oppure magari è in stato di ipnosi; in questo caso normalmente si fa riferimento al concetto *clinico* di «coscienza», che però si limita a fornire delle indicazioni di tipo comportamentale. Che «P è cosciente» può anche voler dire 2) che P è consapevole di qualcosa, sia questa *cosa* uno stato interno oppure esterno al *soggetto cosciente* in questione; per esempio P è consapevole di poter cantare per 4 ore di seguito senza mai fermarsi, oppure P sa che sua moglie crede di fargli piacere celebrando il suo compleanno. Infine, 3) quando si dichiara che «P è cosciente» si può anche voler sostenere che P prova sensazioni di vario genere, come per esempio quando P si fa una doccia gelata perché si è rotto lo scaldabagno di casa sua, oppure quando P ha assaggiato per la prima volta in vita sua una nespola del Giappone, o infine quando P è soddisfatto per aver dato scacco matto ad un suo avversario particolarmente temibile in una partita di scacchi.

Dei tre sensi di «coscienza» che ho appena elencato è intorno al secondo e al terzo che si è sviluppato il dibattito filosofico e scientifico. Il senso 2) e 3) di «coscienza» indicano le due dimensioni coscienti, spesso, ma non sempre, complementari, di un soggetto cognitivo che può essere considerato a tutti gli effetti una *persona*.

Il senso 2) indica tutti quegli stati di una persona che sono noti di solito come stati della *coscienza d'accesso*: sono gli stati in cui si trova un soggetto che è nella condizione di attenzione e consapevolezza per cui i suoi stati mentali e comportamentali gli sono cognitivamente *trasparenti*, per esempio le sue credenze e i suoi desideri. Il contenuto di credenze e desideri, infatti, è disponibile ad un soggetto, che può elaborarlo in altre varie operazioni conoscitive: ad esempio, se io so che voglio bere una birra fresca e se so che per poter bere una birra fresca un modo per procurarmela è quello di andarmi a comprare la birra al pub dell'angolo, allora dovrò utilizzare il contenuto dei miei desideri e delle mie credenze relativi al bere una birra fresca definendo una strategia cognitiva e d'azione che mi porterà a raggiungere il soddisfacimento del mio desiderio, e comincerò a fare tutta una serie di calcoli e valutazioni che sommate mi consentiranno di stabilire se posso effettivamente realizzare il mio desiderio o no (per esempio, comincerò col cercare di ricordarmi quanti soldi ho in tasca, ecc. ecc.).

Il terzo senso di coscienza che ho preso in considerazione, infine, include tutti quegli stati che corrispondono al mondo delle sensazioni (piacere, dolore, rabbia, ecc.): questo tipo di «coscienza» normalmente è indicato come concetto di «coscienza fenomenica», e obiettivamente è quello più problematico; ma anche il più affascinante. Assaporare un gelato al pistacchio, sentire il lancinante mal di denti provocato da una brutta carie

che ha investito il vostro secondo molare sinistro, provare l'emozione di un bacio della persona di cui siamo innamorati, ecc., sono tutte sensazioni di cui, apparentemente, si ha esperienza ad un livello di immediatezza che non ammette ulteriori elaborazioni cognitive. Di queste sensazioni è difficile render conto in termini *proposizionali*, vale a dire, con espressioni che ne consentano una descrizione verbale adeguata. Le sensazioni, infatti, sono stati *soggettivamente primitivi*, che quindi non possono essere altrimenti comunicati con modalità che ne consentano una caratterizzazione pubblica e obiettiva. Per esempio, se io dico che «Il Presidente della Repubblica è più anziano del Presidente della Camera dei Deputati», comunico una informazione obiettiva, che magari può essere interpretata in vari modi e secondo le varie intenzioni e il tono con cui la frase è pronunciata, ma il cui contenuto è difficilmente discutibile. Il significato di questa frase è abbastanza incontestabile. Ma se io dico che «Trovo inconfondibile il profumo dei fiori del mio gelsomino» sostengo qualcosa di molto più controverso. Vi comunico infatti una mia sensazione, quella relativa al profumo dei fiori del mio gelsomino, che ha una peculiarità davvero eccezionale; infatti, se si riflette bene su quanto sostengo, si può capire che riguardo alla mia sensazione corrispondente all'odore che avverto dei fiori del gelsomino non c'è alcun modo di disporre di una qualche conferma o di un qualche riscontro oggettivo. Sicuramente vi fidate di quanto io vi dico in merito al profumo dei fiori del mio gelsomino; ma allo stesso tempo dovete rendervi conto che non avete idea della sensazione effettiva che io avverto in relazione al profumo di quei fiori.

3. Oltre la coscienza cartesiana

Dopo la distinzione fra vari tipi di coscienza forse è più semplice caratterizzare quella prima concezione della coscienza che aveva inaugurato Cartesio. Sembrerebbe che gli stati coscienti così come sono descritti nella prospettiva cartesiana siano forme di coscienza d'accesso relative ad altri stati coscienti che possono essere, questi ultimi, o a loro volta stati coscienti d'accesso di sensazioni (come il caso della consapevolezza di un mal di denti) oppure stati coscienti fenomenici (la sensazione stessa dell'avvertire il mal di denti). Quindi, verosimilmente, la coscienza di cui parlava Cartesio era una coscienza di tipo analogo a quella per cui una persona sa, è consapevole che sta provando una certa sensazione, per esempio: «Io so che sto provando un gran mal di denti». La coscienza descritta da Cartesio pertanto non era la versione più semplice, più elementare, in quanto sostanzialmente si tratta di una forma di coscienza di uno stato mentale il cui contenuto è identificabile: in questo senso siamo sempre coscienti *di qualcosa*. Non tutti gli stati di coscienza fenomenica invece sembrano necessariamente dover essere associati ad un determinato contenuto; in quanto tali, dunque, gli stati di coscienza sembrano avere uno status primitivo prioritario rispetto al concetto cartesiano. cosciente: uno stato mentale di secondo ordine, perché ha per oggetto a sua volta un altro stato mentale dotato di un certo contenuto.

Tuttavia la convinzione che la coscienza cartesiana in realtà non equivalga ad una

forma primitiva e irriducibile di coscienza non si smonta facilmente. Infatti sembra abbastanza ovvio che ogni volta che una persona si trovi in un certo stato mentale cosciente, quella persona sia cosciente di un tale stato. In effetti, il rapporto privilegiato con cui ci poniamo nei confronti di uno stato cosciente pare attribuirci una particolare forma di autorità (la cosiddetta «autorità della prima persona») che ci conferisce una sorta di infallibilità nel rivendicare come proprio un determinato stato cosciente di cui abbiamo esperienza. Se io ora assaporo un gelato al pistacchio, è ovvio che so che sto assaporando un gelato al pistacchio; anzi, a maggior ragione, proprio la dimensione soggettiva dell'esperienza che mi fa cogliere *questo* sapore di *questo* gelato al pistacchio di cui solo *io* in una situazione specifica posso avere piena cognizione. Quindi sembrerebbe anche lecito dubitare del fatto che sia possibile lo stato di coscienza fenomenica di un soggetto che allo stesso tempo non sia anche uno stato di coscienza d'accesso, e viceversa. Insomma, è veramente legittima la distinzione tra stati di coscienza d'accesso e stati di coscienza fenomenica?

Basta poco a capire che una distinzione tra queste due forme di stati coscienti è piuttosto plausibile. In primo luogo, infatti, è facile pensare a stati di coscienza fenomenica che non sembrano corrispondere a stati di coscienza d'accesso. Si pensi infatti alla situazione in cui siamo coinvolti in una conversazione piuttosto animata, magari in un locale pubblico: anche altre persone possono essere impegnate a discutere, ma noi né facciamo attenzione a quel che dicono né al fatto che stanno parlando; eppure potremmo facilmente ascoltare la *loro* conversazione, che cosa si dicono e come se lo dicono. In casi del genere dunque è possibile sostenere che siamo (fenomenicamente) coscienti che altri stanno parlando, ma allo stesso tempo non abbiamo coscienza (d'accesso) di quello di cui stanno parlando e di come ne stanno parlando. D'altra parte è facile rendersi conto anche che tutti gli stati mentali che sono caratterizzabili come *credenze* difficilmente possono essere identificati come stati mentali che suscitano determinate sensazioni: che cosa si può provare, quale può esser mai la sensazione nel pensare che «un triangolo equilatero è anche un triangolo equiangolo»[1]?

Una parziale conferma *empirica*, non soltanto argomentativa, dell'ipotesi che esistano stati di coscienza d'accesso che non coincidono con stati di coscienza fenomenica si presenta con i casi di *vista cieca* (in inglese *blindsight*): soggetti (umani e primati non umani) che risultano avere una parte del cervello, funzionale alla vista, nota come corteccia primaria visuale (localizzata nell' area cerebrale *V1* e della *corteccia striata*) danneggiata, si ritrovano con una zona del loro campo visivo come se fosse oscurata, occultata. Sebbene siano capaci di discriminare con buona approssimazione tra gli stimoli visivi che si presentano entro quella zona, come per esempio una X oppure una O, e quindi, per quanto abbiano una qualche consapevolezza di una determinata esperienza visiva, straordinariamente non sono in grado di rendersi conto in modo adeguato di quella esperienza visiva, in un certo senso sembrano quasi non sentirsi di rivendicare come propria quella esperienza. I casi di vista cieca sono stati interpretati come situazioni in cui un soggetto ha coscienza d'accesso della propria esperienza

visiva, ma non coscienza fenomenica. Si noti come la vista cieca sia un fenomeno che solamente gli sviluppi notevoli delle neuroscienze, negli ultimi due o tre decenni, hanno permesso di comprendere. Ne è derivata una conoscenza molto più ampia, relativa ai meccanismi cognitivi estremamente sofisticati che soggiacciono alla correlazione tra il *vedere* e il *rendersi conto* di vedere. E questa conoscenza ha sicuramente contribuito a far chiarezza su aspetti della coscienza che i filosofi di solito tendevano a confondere, più che spiegare.

4. Il *problema difficile* della coscienza

La distinzione tra coscienza fenomenica e coscienza d'accesso, corroborata anche a livello empirico, come si è visto, ha effettivamente messo in luce la vera difficoltà nella spiegazione della coscienza; difficoltà che è stata identificata con la coscienza fenomenica. Infatti, per quanto ci siano ancora molti problemi irrisolti, relativi alla coscienza d'accesso, questi sembrano almeno concettualmente avvicinabili, trattabili con gli strumenti che sono normalmente impiegati dagli addetti ai lavori. Gli psicologi cognitivi, e gli scienziati cognitivi in generale, sembrano in grado di spiegare in maniera coerente e abbastanza soddisfacente il tipo di procedure cognitive in cui è coinvolta la coscienza d'accesso. Del resto, queste procedure cognitive sono definite ad un livello di analisi, in termini di trasmissione di informazione, che si presta adeguatamente alle elaborazioni teoriche di questi studiosi. Gli stati di coscienza d'accesso, in pratica, in questo ambito, sono considerati alla stregua di elementi che informano una persona sul proprio stato psicofisico. Per esempio, se mi fa male un dente, una determinata sensazione mi informa (con urgenza) che nel mio organismo c'è qualcosa che non va, quindi sono indotto ad agire di conseguenza (prendere un analgesico, andare dal dentista, ecc.).

Tuttavia, come ha fatto notare lo psicologo e filosofo americano Ned Block in un importante saggio del 1995 [1], gli stati coscienti non possono essere identificati semplicemente con il (presunto) contenuto informativo che trasmettono. Perché infatti degli stati informativi devono necessariamente manifestarsi tramite delle sensazioni? Perché, per esempio, se devo essere informato che una spina si è conficcata nel mio alluce sinistro, devo avvertire una sensazione così sgradevole? Perché devo provare dolore? Non potrebbe esservi un altro modo, meno noioso, meno dispendioso (in termini cognitivi) di essere avvertiti? In fondo quando facciamo dei calcoli aritmetici non sembra che si provino (di solito) sensazioni di piacere o di dolore. Inoltre, identificare informazione e coscienza, secondo Block, equivale ad identificare uno stato cosciente con il suo contenuto: è un po' come pensare che un brano musicale non sia altro che le note in cui è codificato. Ma in realtà sappiamo benissimo che quando ascoltiamo un brano musicale percepiamo ben altro rispetto alle note che corrispondono a determinati impulsi acustici; noi sentiamo quegli impulsi acustici, sentiamo la musica; e avvertiamo anche diverse sfumature che caratterizzano l'ascolto di quel brano musicale: i differenti strumenti musicali con cui può essere eseguito, le differenti interpretazioni che ne sono

state fatte, ecc.

Per Ned Block, che quindi distingue nettamente tra il contenuto di uno stato cosciente, corrispondente alla sua dimensione quantitativa (in quanto codificabile), e il suo aspetto fenomenico o *qualitativo*, è quest'ultimo che effettivamente dà del filo da torcere, è questo il *problema difficile* della coscienza. Ed è un problema difficile perché si tratta di un fenomeno, quello della soggettività, della dimensione qualitativa della coscienza, che non sembra poter essere trattato dalle risorse concettuali che sono normalmente a disposizione della filosofia e della scienza. Una spiegazione (scientifica o filosofica) infatti, dovrebbe fornire la possibilità di rendere oggettivamente comprensibile un determinato fenomeno[2]; ma come è possibile rendere oggettivo il soggettivo per eccellenza?

Sembrerebbe infatti che per quanto si possa arrivare a sapere in merito a tutti i processi psicologici e cerebrali (in termini anatomici, fisiologici, biologici, ecc.) che corrispondono allo stato cosciente di una persona, non sia disponibile una modalità esplicativa che ci faccia capire che cosa effettivamente accade, che cosa *sente*, quando si trova in un determinato stato di coscienza. Supponiamo che vi sia fornito un dossier che specifica esattamente tutto quello che c'è da sapere relativamente alla mia condizione quando assaggio un gelato al pistacchio; e supponiamo anche che conosciate per filo e per segno in che stato si trova ogni neurone del mio cervello, quali sono i circuiti attivati, quali le reazioni biochimiche avvenute, ecc. Potremo dire che avete conoscenza di quello che io sto provando nel sorbire il gelato al pistacchio? [cfr. 10]

Il problema esiste se si accetta la differenza tra uno stato cosciente e il suo contenuto, considerando che l'identità di uno stato cosciente coincide con un punto di vista esclusivo. Per rendere le cose più chiare farò un'analogia. Se quattro persone, A, B, C e D siedono (in quest'ordine) ad un tavolo quadrato che ha al centro una statua, a seconda del lato del tavolo dal quale osserveranno la statua le quattro persone avranno ciascuna una prospettiva differente. A potrà vedere la statua da una prospettiva diametralmente opposta rispetto a C, e così via. Ogni persona avrà un suo punto di vista dal quale osservare la statua. Possiamo assimilare la coscienza ad un punto di vista, ma uno stato cosciente non è limitato solamente allo spazio occupato da un osservatore e non è relativo solamente alla vista, ma coincide con l'insieme spazio-temporale di tutti gli elementi che implementano il complesso dei processi cognitivi (non solo visivi, ma percettivi in genere) di una persona. Siccome ogni essere umano è diverso dall'altro e poiché è dotato di un suo *punto di vista*, per così dire, *mentale*, che coincide con l'insieme delle sue percezioni, ne consegue che ogni essere umano avrà un punto di vista mentale differente, avrà una sua specifica dimensione fenomenicamente cosciente. Tale dimensione cosciente è dunque considerata come una dimensione epistemicamente qualitativa, nonostante sia analizzabile in termini (fisici, neurali, biologici) quantitativi. Del resto, se tutti gli esseri umani (o anche altri animali) sono diversi individualmente l'uno dall'altro, è plausibile che differiscano anche nelle loro dimensioni cognitive. Una dimensione cognitiva individuale è implementata da un

sostrato individuale psicofisico; perché non si può sostenere che questa dimensione cognitiva è diversa e irriducibile ad altre prospettive? Come lo spettatore A non avrà mai lo stesso punto di vista dello spettatore C di fronte al tavolo, così non ci sarà mai un essere umano che avrà lo stesso punto di vista di un altro essere umano. La ragione è ovvia: la sostanza materiale individuale che costituisce un soggetto cognitivo è sempe quantitativamente differente rispetto ad altre sostanze materiali individuali, che non potranno mai trovarsi esattamente nella medesima condizione psicofisica. L'unica possibilità che A potrebbe avere per cogliere il punto di vista di C sarebbe quello di prendere il suo posto; ma nel momento stesso in cui prendesse il suo posto, avrebbe un punto di vista diverso da quello di C. Insomma, si potrebbe sostenere che l'unica possibilità di poter comprendere esaurientemente la dimensione cosciente degli altri sarebbe quella di trasformarsi negli altri.

Il problema difficile della coscienza consiste in un *gap esplicativo* che di fatto sembra concettualmente insuperabile sia in ambito filosofico che in ambito scientifico. Vista questa difficoltà costitutiva del problema della coscienza, un problema che fondamentalmente riguarda l'impossibilità di trasformare una dimensione soggettiva e qualitativa, per definizione, in una dimensione oggettiva e pubblica, apparentemente, per il momento e allo stato attuale delle nostre conoscenze non esistono soluzioni disponibili per la sua soluzione.

A confermare un'idea del genere molti filosofi, persuasi dell'irriducibilità della dimensione qualitativa della coscienza, hanno proposto diverse argomentazioni in favore della loro convinzione. Tra queste la versione di maggior successo, probabilente la prima e la più originale, è stata quella di Thomas Nagel, filosofo americano di origine serba, che in un famosissimo articolo del 1974 [7], intitolato «Che effetto fa essere un pipistrello?» ha sostenuto che siccome la dimensione qualitativa e soggettiva della coscienza (fenomenica, ovviamente) non può essere tradotta in altre forme di conoscenza oggettivamente accessibili, e poiché l'unica possibilità di comprendere la prospettiva soggettiva degli altri è quella di confrontarla con la nostra, vi possono essere delle forme di esperienza soggettiva talmente differenti dalla nostra che di fatto non possono essere neppure immaginabili. L'esempio è quello di un pipistrello, un mammifero alato dotato di un apparato sensoriale assai particolare, molto diverso da quello umano. Com'è noto questo chirottero utilizza un sistema sonar, simile a quello di un sommergibile, che gli consente di individuare ostacoli e obiettivi (prede per la sua caccia notturna) nell'oscurità, producendo ultrasuoni in base ai quali si orienta seguendone l'eco. E' chiaro come sia praticamente impossibile immaginarsi l'esperienza di un pipistrello quando impiega il suo sonar! La percezione tramite un sonar è in qualche modo paragonabile al nostro apparato visivo o uditivo?

Di fronte a questa *impasse epistemologica* si ha l'impressione che gli atteggiamenti da assumere siano sostanzialmente due. Il primo è quello della filosofia che si potrebbe definire di impostazione *soggettivistica* (Esistenzialismo, Fenomenologia, Ermeneutica, ecc.), che assume la coscienza come fenomeno di partenza per la propria indagine

accettandone la caratterizzazione cartesiana, senza avvertire l'esigenza di spiegare in che cosa essa consista e considerandola come fenomeno primitivo e irriducibile. Del resto, come ho già accennato, l'ambito speculativo di cui si occupa questa filosofia, che investe la sfera dell'esperienza soggettiva della *persona*[3] nella sua relazione con il mondo, non ha bisogno di una caratterizzazione rigorosa di «coscienza«. Il secondo atteggiamento, della filosofia che simpatizza con le scienze naturali, chiamiamola filosofia *oggettivistica*, non sembrerebbe che poter essere rinunciatario, come in effetti lo è stato a lungo per gran parte del XX secolo. Dal momento che non si può disporre di una griglia esplicativa adeguata che renda conto in termini rigorosi e oggettivi della coscienza, l'orientamento di questo secondo atteggiamento suggerirebbe di escludere la coscienza dall'ambito dei fenomeni che possono essere spiegati dall'attività filosofica e scientifica.

Vale veramente la pena lasciar perdere? Davvero ogni tentativo di spiegazione della coscienza è destinato al fallimento? La scienza, le nuove scienze della mente e del cervello (e soprattutto le neuroscienze), proprio non possono dirci nulla in merito alla coscienza fenomenica? Forse le discipline scientifiche non potranno risolvere quello che Ned Block ha definito il problema difficile della coscienza, ma possono contribuire, come nel caso già preso in considerazione della vista cieca, a fare chiarezza sul modo di impostarlo, questo problema difficile: ogni aiuto in una questione così complessa è prezioso.

5. Il contributo delle neuroscienze

Grazie ai progressi importanti che sono stati fatti dalle discipline scientifiche che studiano il sistema nervoso centrale, al giorno d'oggi si sa molto di più rispetto a quanto non si sapesse circa un secolo fa, sul cervello e sulle funzioni cognitive che implementa; sebbene, e ogni studioso del cervello lo potrà confermare, probabilmente sappiamo ancora pochissimo rispetto a quanto del cervello potremmo sapere e, si spera, arriveremo a sapere. Sulla base delle conoscenze attuali e superando i tradizionali pregiudizi scientifici nei confronti della coscienza, alcuni scienziati di chiara fama si sono cimentati con il problema della spiegazione della coscienza fenomenica. Non è un caso che le loro ipotesi siano direttamente associate a nuove teorie formulate sulla scorta dei recenti progressi delle neuroscienze, che, anche in virtù delle più aggiornate tecnologie utilizzate per lo studio del cervello[4], ci offrono informazioni importantissime sul modo in cui si comportano le strutture cerebrali in corrispondenza di determinate attività cognitive ed emotive. Le ipotesi degli scienziati che si sono occupati del problema della coscienza fenomenica non suggeriscono spiegazioni che consentano di superare il gap esplicativo tra la dimensione soggettiva e quella oggettiva; tuttavia sono in grado di presentare correlati neuroanatomici, neurofisiologici e neurobiologici della coscienza qualitativa che possono determinare, per esempio, quali strutture cerebrali sembrerebbero essere necessarie alla realizzazione di esperienze coscienti, per poter definire così quali sono le condizioni alle quali un sistema cognitivo (organico o inorganico, più o meno complesso) potrebbe dirsi *fenomenicamente* cosciente. Si potrebbe quindi arrivare a

stabilire se e come un sistema cognitivo artificiale particolarmente sofisticato (pensiamo ai *cyborg* di molti film di fantascienza, come i vari *Blade Runner*, *Terminator*, *RoboCop*, ecc.) abbia effettivamente esperienze fenomeniche, oppure se un'ameba o un'altra forma dotata di strutture neurali meno complesse di quelle di un essere umano possa essere considerata cosciente, ecc.

Tra gli scienziati che hanno avanzato ipotesi particolarmente suggestive sui correlati neurali della coscienza, soprattutto perché ispirate proprio alle scoperte più recenti delle neuroscienze, si distingue il premio Nobel Francis Crick (1906-1978)[5]. L'ipotesi di Crick [cf. 3] (che egli ha formulato insieme al collega Christof Koch) è costruita intorno all'idea che il nostro sistema cognitivo debba articolare coerentemente le informazioni eterogenee derivanti da una percezione. Anche l'oggetto di una percezione elementare infatti, la semplice immagine di un oggetto, per esempio, è composto da un insieme di informazioni differenti che sono verosimilmente elaborate da differenti strutture neurali (quelle deputate alla definizione della forma, del colore, del movimento, ecc.) che a loro volta sono costituite da una moltitudine (nei casi elementari molte centinaia di neuroni, normalmente diverse migliaia) di neuroni. I neuroni corrispondenti a determinate aree cerebrali che elaborano informazioni coerenti, secondo Crick (e Koch), devono agire simultaneamente e dare origine a circuiti oscillanti sincronizzati sulla medesima frequenza ricorrente di 40 stimolazioni ca. al secondo (-per questo Searle ha denominato quella di Crick e Koch l''*ipotesi dei 40 Hertz*'). Crick ha poi esteso quest'ipotesi, apparentemente valida per il correlato neuronale della percezione di un'immagine coerente, alla percezione in generale, sostenendo che l'insieme dei neuroni sincronizzati a scaricare alla frequenza di 40 Hertz corrisponderebbe alla coscienza fenomenica del vedere qualcosa.

Il fisico e matematico Roger Penrose [8], luminare inglese, si è cimentato con il problema della coscienza in una prospettiva ben più speculativa. L'approccio di Penrose è complesso e controverso: partendo da una (presunta) dimostrazione della differenza tra la mente umana e un sistema formale attraverso l'uso (disinvolto) dei (complessi) teoremi del logico e matematico Kurt Gödel (1906-1978), il fisico e matematico inglese sostiene che la chiave per la spiegazione degli stati fenomenicamente coscienti di una persona si troverebbe negli effetti della gravità descritti dalla fisica quantistica sui micro-tubuli (strutture sub-cellulari che contribuiscono a costituire l'impalcatura rigida di una cellula) dei neuroni.

Un altro premio Nobel, Gerald Edelman[6], ha impostato la formulazione del problema della coscienza da una prospettiva neoevoluzionistica, nota come *Darwinismo neuronale*. Per il Darwinismo neuronale le funzioni cognitive, corrispondenti a funzioni cerebrali, si definiscono attraverso un percorso selettivo che determina la sopravvivenza nel cervello di specifici circuiti neuronali in base alla loro adeguatezza di risposta agli stimoli dell'ambiente e alle loro dinamiche interattive ontogenetiche. Da questa competizione tra strutture cerebrali, che avviene ad ogni livello (tra singoli neuroni, tra sinapsi, tra gruppi neuronali, ecc.), emergerebbero anche dei particolari circuiti

neuronali dai quali avrebbe origine la coscienza, che si potrebbe sviluppare, secondo Edelman [5], solamente in organismi dotati di strutture sufficientemente complesse da poter implementare funzioni cognitive superiori come la memoria, l'apprendimento, il linguaggio. La coscienza, intesa come struttura cerebrale e cognitiva complessa, avrebbe la funzione di rappresentare una *immagine di sé* che consentirebbe di esercitare un miglior controllo delle proprie azioni e reazioni nei confronti dell'ambiente.

Ciascuna di queste ipotesi si fonda su basi neuroscientifiche più o meno consolidate: Crick ha formulato l'idea della coscienza come una specie di *effetto di sintonizzazione sulla medesima frequenza* dei neuroni che costituiscono varie aree anatomico-funzionali del cervello umano; Penrose ha identificato la coscienza come fenomeno emergente dal comportamento di particolari strutture del citoscheletro dei neuroni; Edelman ritiene che la coscienza possa avere origine solamente in organismi che siano dotati di strutture cerebrali sufficientemente sviluppate in modo tale da consentire funzioni cognitive superiori e che siano reciprocamente comunicanti. E' evidente come, per quanto parziali, queste ipotesi abbiano un obiettivo punto di forza, che ne qualifica il livello di credibilità, nel fatto che siano radicate in teorie scientifiche molto recenti e per certi aspetti all'avanguardia, che possono avvalersi (almeno in linea di principio) di un terreno di conferma particolarmente convincente che è la ricerca empirica. Del resto, allo stesso tempo, per quanto siano caute le ipotesi formulate dagli scienziati che si sono cimentati con il problema della coscienza, si imbattono nella medesima difficoltà già menzionata del *gap esplicativo*: un problema che spesso è trascurato se non ignorato del tutto a causa di una certa ingenuità concettuale delle analisi scientifiche applicate ad una questione tanto sottile e sofisticata.

Tuttavia, per quanto parziali, le spiegazioni scientifiche potrebbero almeno aspirare a delimitare l'ambito in cui sarebbe lecito parlare della coscienza nell'orizzonte dei fenomeni naturali. In altre parole, se anche fosse una contraddizione in termini trattare la coscienza con una metodologia propria delle scienze naturali, quale quella delle neuroscienze, proprio le teorie neuroscientifiche al momento sembrano rappresentare la piattaforma disciplinare più adeguata da cui partire per poter individuare le correlazioni della coscienza che è a sua volta considerata il presupposto di ogni esperienza personale della dimensione umana. Anche per riuscire a cogliere dei rapporti di correlazione tra gli aspetti qualitativi dell'esperienza e quelli quantitativi che le neuroscienze meglio riescono ad identificare, occorre una prospettiva critica che possa orientare la metodologia delle neuroscienze; a questo scopo può servire la riflessione filosofica oggettivistica che tradizionalmente procede di pari passo con la scienza.

6. Una brevissima conclusione

Molti dei problemi che sono un retaggio tradizionale della ricerca filosofica (l'intenzionalità, il contenuto mentale, lo stesso problema dell'identità tra mentale e fisico, ecc.) sono stati tradotti nel linguaggio della scienza e, grazie a questa trasformazione, sembrano oggi più accessibili che in passato. La filosofia tuttavia ha ancora molto da dire sia su

quegli stessi fenomeni, seppur in una prospettiva differente, che in altri, generati dalla loro riformulazione in termini scientifici. Ma con la coscienza la situazione è diversa: questo fenomeno infatti sembra ancora ampiamente caratterizzato teoricamente ad un livello concettuale, e filosofico in generale, che sfugge agli strumenti esplicativi della scienza e delle neuroscienze in particolare. Proprio per questa ragione le attuali ricerche sulla coscienza devono procedere assecondando un rapporto di mutua cooperazione tra (neuro)scienze e filosofia: nel tentativo di rendere il problema della coscienza più comprensibile e, per quanto in un futuro remoto, resolubile. Ad un programma del genere, del resto, hanno lavorato e stanno lavorando con un certo successo filosofi come Paul e Patricia Churchland, Daniel Dennett, Alvin Goldman e scienziati come Antonio Damasio, Francisco Varela, Vittorio Gallese e molti altri.

NOTE

[1] Qualcuno potrebbe anche obiettare (come per es. ha fatto Michael Tye [10]) che in realtà potrebbero esservi stati soggettivi differenti corrispondenti ad occorrenze del medesimo contenuto proposizionale: il mio pensare che «un triangolo equilatero è un triangolo equiangolo» quindi potrebbe differire dal pensare questa proposizione da parte di qualcun altro, oppure sempre dal mio pensiero ma in tempi diversi. Comunque questa è un'ipotesi che conviene non prendere in considerazione, per questioni di spazio.

[2] Qui naturalmente mi riferisco a filosofie che assumono un atteggiamento parallelo a e compatibile con quello scientifico e che non si pongono in una dimensione radicalmente alternativa ad esso, come l'Esistenzialismo o gran parte della tradizione Fenomenologica ed Ermeneutica. Queste del resto sembrano perseguire anche obiettivi speculativi alternativi, diversi dalla spiegazione di fenomeni circoscritti dell'esperienza umana; direi che aspirano piuttosto a cogliere il significato complessivo dell'esperienza umana. La «coscienza» (fenomenica) ad esempio, per l'Esistenzialismo, la Fenomenologia e l'Ermeneutica, non è un problema, ma un aspetto presupposto e considerato primitivo e costitutivo dell'esperienza umana, che non ha bisogno di essere risolto perché nella sua accezione cartesiana è già sufficientemente (auto)evidente.

[3] «Persona» intesa come entità psicofisica irriducibile e indistinguibile nel suo dualismo psicologico e materiale.

[4] Al giorno d'oggi è possibile disporre letteralmente di *immagini* del cervello e di quello che in esso avviene in relazione a certe attività cognitive, grazie a tecniche come la *Tomografia* ad *Emissione* di *Positroni* (TEP) o l'*Immagine* della *Risonanza Magnetica funzionale* (IRMf); naturalmente sono immagini approssimative, derivate dall'elaborazione di soft-ware molto sofisticati applicati alle informazioni relative alle reazioni chimiche ed elettriche di specifiche aree del cervello e che possono anche avere ampi margini di errore: non sono di fatto fotografie *del* cervello.

[5] A Crick e al suo collega James Watson fu riconosciuto il premio Nobel per la medicina nel 1962, per le scoperte relative alle strutture molecolari del DNA.

[6] Anche ad Edelman è stato tributato il Nobel per la medicina, nel 1972, per le sue ricerche sul sistema immunitario.

Bibliografia

[1] Block, N., On a confusion about a function of consciousness, in Block, N., Flanagan, O. and Güzeldere G. (a cura di), *The nature of consciousness. Philosophical debates*, The MIT Press, Cambridge (Mass.) 1995: pp. 375-415.

[2] Chalmers, D., *La mente cosciente*, trad. it. McGraw-Hill Libri Italia, Milano 1999.

[3] Crick, F., *La scienza e l'anima*, trad. it. Rizzoli, Milano 1994.

[4] Descartes, R., *Principi della filosofia*, in *Opere* I-IV, trad. it. Laterza, Roma-Bari 1986.

[5] Edelman, G., *Sulla materia della mente*, trad. it. Adelphi, Milano 1996.

[6] Locke, J., *Saggio sull'intelletto umano*, trad. it. Bompiani, Milano 2004.

[7] Nagel, T., Che effetto fa essere un pipistrello?, trad. it. in Nagel, T. *Questioni Mortali*, Il Saggiatore, Milano 1986, cap. 12.

[8] Penrose, R., *Ombre della mente. Alla ricerca della coscienza*, trad. it. Rizzoli, 1996.

[9] Searle, J. R, *Il mistero della coscienza*, trad. it. Raffaello Cortina Editore, Milano 1998.

[10] Tye, M., *Ten problems of consciousness. A representational theory of the phenomenal mind*, The MIT Press, Cambridge (Mass.) 1995.

La robotica umanoide†

Remo Ricchetti

Progettista Percro Perceptual Devices Division

Carlo Alberto Avizzano

Responsabile Scientifico Lab. Percro

Massimo Bergamasco

Direttore del Laboratorio Percro

Laboratorio Percro- Scuola Superiore di Studi Universitari e Perfezionamento S.Anna, Pisa

1. Introduzione

Le macchine sono entrate nella nostra vita da tempo, da tempo le consideriamo parte naturale del nostro orizzonte quotidiano. Ci conviviamo, le utilizziamo costantemente e non ci fa più nessuna meraviglia il puntuale (pressoché) funzionamento di ogni meccanismo anche molto complesso, che si svolge naturale al nostro semplice premere un bottone, tanto che, anzi, ci pare straordinario il verificarsi del contrario: che talvolta qualcosa non vada per il suo verso. Quando ciò accade, quella consuetudine ormai plurigenerazionale acquisita con la coabitazione con le macchine ci porta ad atteggiamenti irrazionali: si va dall'irritazione pronunciata contro un Ente Creatore Tecnologico (talvolta anche non solo) al tentativo di negoziazione con la macchina (che ti succede? funzionavi fino a poco fa). La lettura spiritosa delle nostre abitudini è parziale almeno quanto l'atteggiamento preteso razionale o ingegneristico che troverà infallibilmente il necessario motivo del malfunzionamento ma che ci porterebbe a non renderci conto della componente sociale che le macchine hanno ormai assunto nella nostra vita.

Se siamo ormai talmente tanto abituati alle macchine che comandiamo direttamente (le automobili, gli utensili elettrici, oggetti complicati come gli orologi e persino gli aeroplani) da considerarle per l'appunto 'oggetti', pure semplici comportamenti 'autonomi' esibiti da una macchina sono ancora in grado di stupirci secoli dopo la rivoluzione industriale e dopo millenni dalle realizzazione dei primi prodìgi semoventi. In certi casi, complice l'ignoranza o un'ingenuità naïf, lo stupore lascia spazio ad atteggiamenti apocalittici in cui «la macchina prende il sopravvento» sull'uomo.

Come succede spesso, tali tematiche tecnologico-sociali emergenti vengono

anticipate da immaginazioni ben più fervide di quelle degli addetti ai lavori. La coabitazione di uomo e macchina, specie se di macchina senziente e antropomorfa, da sempre esercita un fascino intellettuale che affonda le sue radici nello spirito prometeico, di sfida dell'Uomo a Poteri superiori, che altri vorrebbe, così, sacrilegamente violati.

Molti lettori di fantascienza hanno care le leggi della robotica di Asimov:

> 0. Un robot non deve provocare danno all'umanità sia tramite la sua azione che tramite un comportamento passivo.
>
> 1. Un robot non deve ferire esseri umani o tramite la sua non azione consentire un danno agli stessi.
>
> 2. Un robot deve obbedire agli ordini degli esseri umani eccetto quando questi siano in contrasto con la prima legge.
>
> 3. Un robot deve agire per proteggere la sua stessa esistenza fintanto che tali azioni non siano in contrasto con le prime due leggi.

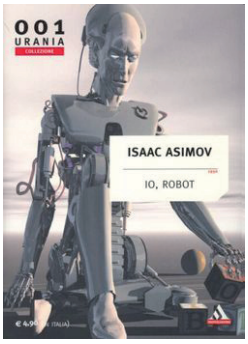


Figura 1 - La copertina dell'edizione Urania di Io, Robot.

Le leggi della robotica, elaborate e codificate dallo stesso scrittore e pubblicate in *Handbook of Robotics* erano inizialmente tre. Sono poi state completate con l'aggiunta della legge 0. Tali leggi codificano le norme etico/comportamentali che un qualsiasi robot deve rispettare. L'organizzazione delle leggi, piuttosto che identificare compiti specifici che un robot deve assolvere si limita a definire il ruolo che questi dispositivi possono assumere all'interno della società, vincolandone l'autonomia di comportamento riguardo alla sicurezza del singolo uomo e dell'intera umanità, quindi alla sua manifestazione di volontà[1].

Le leggi di Asimov, pur avendo costituito un caposaldo della narrativa e della cinematografia robotica, sono solo marginalmente state applicate nel corso della ricerca e dello sviluppo di tecnologie robotiche. Ad esempio, le tecnologie militari, e la robotica associata, hanno da sempre concepito il robot come uno strumento di aggressione in chiara violazione delle norme etiche comportamentali fissate da Asimov. In campo medico, robot automatici e/o semiautomatici possono recare 'offesa' ai pazienti al fine di portare a termine l'operazione secondo le volontà di un chirurgo. In campo formativo,

dei robot possono opporsi alla volontà dei discenti al fine di mostrare forme e gesti di un comportamento corretto.

È il caso della trasmissione della conoscenza cosiddetta enattiva, o *embodied cognition*, quella modalità di trasferimento di informazione non verbale tipica dell'apprendimento operativo, frequente nell'apprendistato degli artigiani o nell'insegnamento del ballo o di altri gesti, per esempio sportivi, in cui l'informazione è a volte completamente contenuta nel gesto. Un robot che dovesse guidare l'utente ad apprendere il movimento corretto si troverebbe spesso nella necessità di opporsi a movimenti scorretti che peraltro sarebbero espressione della volontà del suo utente umano. Più comunemente questi conflitti si verificano nella robotica riabilitativa, dove macchine seguono e guidano il movimento degli arti dei pazienti forzandoli a recuperare determinate mobilità.

Pertanto è sbagliato pensare che tali leggi debbano sempre e comunque essere un punto di riferimento per lo sviluppo di sistemi robotici.

Se è ingenuo pensare che queste leggi siano sufficienti e conchiuse, considerevole è la notizia che le leggi di Asimov saranno il punto di partenza della carta sull'etica dei robot che il ministero dell'industria coreano ha annunciato di voler pubblicare in previsione della stretta collaborazione fra uomini e robot già nel prossimo decennio. Questo per dire come l'approccio non strettamente scientifico o tecnico sia ingrado di individuare con ampio anticipo tendenze ed esigenze sociali.

La storia della robotica è tuttavia costellata di anticipazioni e suggestioni letterarie e mitiche.

2. La robotica umanoide fra storia e mito

La parola 'robot' è stata introdotta nell'uso dal drammaturgo ceco Karel Čapek per indicare il lavoro non volontario nella sua opera teatrale *R.U.R.* (*Rossum's Universal Robots*) nel 1921. Nella fantasia dell'autore organismi assoggettati vengono utilizzati per il lavoro pesante, nuovi schiavi. I robot di Capek erano però organismi, non macchine. L'etimologia della parola robot è comunque da ricondursi al ceco 'robota' che significa *schiavo*.

Per l'accezione attuale del termine robotica come disciplina relativa allo studio ed all'uso dei robot bisogna attendere il 1942, anno in cui il già citato Isaac Asimov pubblica *Runaround*, un racconto ripreso più tardi nel più famoso *Io, robot*. Se la parola nell'accezione attuale nasce nella prima metà del secolo scorso, l'interesse per la creazione di entità capaci di replicare (anche parzialmente, anche e soprattutto in maniera imperfetta) le funzioni e le forme dell'uomo si perde addirittura nel mito.

Già nella mitologia greca Efesto aveva creato un uomo di bronzo posto a difesa dell'isola di Creta: il gigante Talo. Esso traeva vita da un'unica vena che lo percorreva tutto nella quale scorreva metallo fuso e che era chiusa da una vite in prossimità del tallone, sito delicato come per altri invincibili.

Notizie di prime macchine se-moventi risalgono al VI secolo d.C. La nostra attuale familiarità con organismi meccanici rischia di non farci comprendere la sorpresa

che poteva causare un semplice meccanismo a molla, in quel tempo. Se qualcosa di evidentemente artificiale si muoveva, il primo pensiero era che celasse all'interno un essere vivente, un animale o addirittura un uomo, e vi sono stati importanti esempi in questo senso. La capacità dunque di realizzare macchine che comprendessero in sè un motore aveva un tale carattere di straordinarietà di far denominare questi oggetti come 'prodigi'.

Maestri nella costruzione di macchine se-moventi (con caratteristiche eminentemente spettacolari ed ornamentali) furono gli arabi Banu Musà: tre fratelli espertissimi nella costruzione di macchine idrauliche nelle quali figure umane ed animali si muovevano con schemi naturalmente ripetitivi ma con tecnologie talmente sofisticate per l'epoca che andarono perdute con la scomparsa della famiglia. Dopo di loro si rientra in una fase oscura di mito: si racconta di teste parlanti: oggetti sapienti che sapevano dare risposte sagge alle domande che venivano poste loro. Due di tali esempi erano in possesso e fecero la leggendaria fortuna del papa millenarista Silvestro II e di Alberto Magno[2].

Per i secoli successivi gli unici riferimenti a repliche di uomo restano nel fantastico: il golem del rabbino Löw [3], gli homunchuli alchemici del Faust, lo stesso mostro, nel senso esatto di essere straordinario, di Frankenstein.

Dalle macchine sofisticate e dimenticate dei Banu Musà è passato un millennio quando nelle corti d'Europa si risveglia la curiosità per le macchine complicate. Probabilmente complice la nascita degli orologi meccanici, viene cosiderato gran prestigio avere di questi oggetti e non mancarono le beffe.

La più famosa e duratura di queste riguarda il giocatore di scacchi di Kempelen[4], una macchina con le sembianze di un turco giocatore di scacchi che giocava contro qualsiasi giocatore umano, facendo anche conversazione. Il suo ideatore, ad onor del vero, dichiarò la presenza di uno stratagemma, ed infatti la macchina giocava e vinceva grazie alla presenza al suo interno di un nano, perfettamente dissimulato e la cui presenza non risultava alle perquisizioni che il barone di Kempelen, alla stregua degli illusionisti, permetteva ai curiosi. Ciononostante per circa un secolo, la macchina girò per l'Europa e gli Stati Uniti precorrendo le notizie sulla vera natura del suo funzionamento, individuate ben 50 anni dopo il suo apparire da Edgar Allan Poe

Questa macchina, se non può essere considerata un robot perchè non autonoma, pure è notevolissima come esempio di teleoperazione. L'operatore all'interno infatti aveva una replica della scacchiera sulla quale muoveva i pezzi il suo sfidante. Su questa scacchiera un meccanismo magnetico riportava le mosse dello sfidante e un altrettale sistema consentiva all'operatore nascosto di comandare al manichino di spostare i pezzi secondo le mosse effettuate sulla scacchiera nascosta.

Un sistema di teleoperazione permetteva anche la conversazione che avveniva facendo indicare al manichino una sequenza di lettere su una tabella. Purtroppo la macchina è andata perduta e ne restano solo delle descrizioni. La macchina di Kempelen, creata nel 1769, resta in giro per il mondo a stupire gli spettatori fino al 1860.

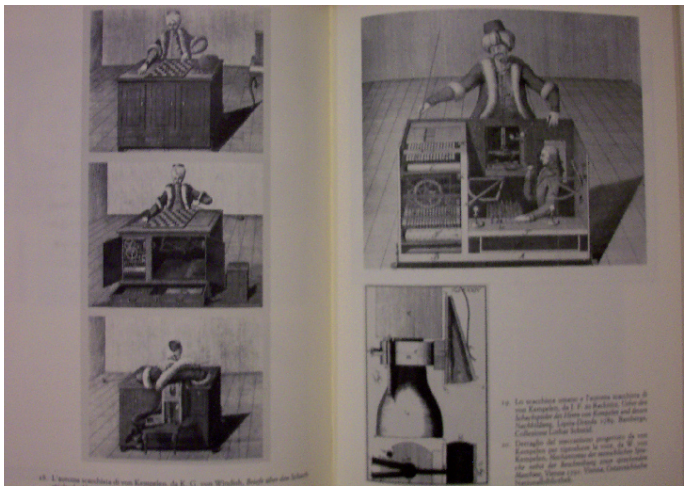


Figura 2 - Il giocatore di scacchi del Barone di Kempelen.

Un segno che i tempi erano maturi per una tecnologia meccanica meno ludica è il telaio di Jacquard. Non è una macchina antropomorfa ma può essere considerata la prima macchina programmabile della storia. Siamo nel 1805.

Per tutto l'Ottocento gli automi non furono altro che giocattoli di lusso, arditi esercizi di orologiai che costruivano manichini che suonavano il flauto o scrivevano lettere con bella grafia e movimenti armoniosi delle loro membra. I vari Droz, Fabergé e Vaucanson furono virtuosi di queste delicate costruzioni, sterili nel loro effettivo utilizzo ma testimoni di una capacità tecnica elevata quanto staccata dalle esigenze e valenze sociali che noi ora vediamo nelle macchine.

È solo all'inizio del secolo scorso che, come abbiamo visto, si affaccia l'idea di macchine automatiche ed autonome che sollevino l'uomo da impegni gravosi, pericolosi o usuranti e perchè tale concetto si trasferisca dalla mente degli scrittori a quella dei tecnologi dobbiamo attendere la metà del secolo.

È infatti il 1948 quando Norbert Wiener pubblica un libro (*Cybernetics or Control and Communication in the Animal*) che descrive i concetti di comunicazione e controllo in sistemi elettronici, meccanici e biologici.

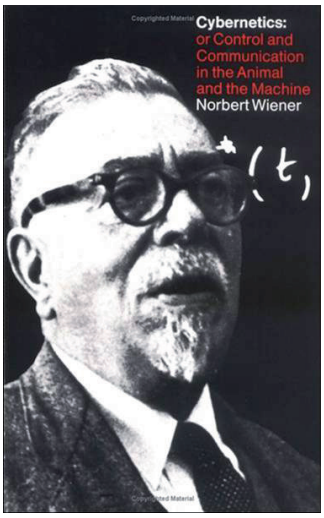


Figura 3 - La copertina del volume di Norbert Wiener.

La Robotica 'vera', ovvero quella realizzata con sistemi e teorie scientifiche come noi oggi siamo abituati a vederla, nasce qualche anno più tardi. Nel 1951, in Francia presso la CEA (Commissione per l'Energia Atomica), Raymond Goertz progetta il primo sistema robotico teleroperato. Si tratta di un prototipo di pantografo meccanico, dotato di controlli e di pinze per realizzare la manipolazione a distanza sostanze radioattive. Uno spesso vetro, posizionato tra operatore e materiale contaminante, provvede a isolare l'uomo, mentre il meccanismo, sfruttando opportune proprietà cinematiche, riproduce fedelmente i movimenti del soggetto nell'ambiente ostile. Qualche anno più tardi sarà lo stesso Goertz a ripresentare il concetto di teleoperazione basato su una architettura di controllo elettromeccanica e non più soltanto elettrica. È il primo passo verso l'automazione industriale: la macchina esegue a distanza le intenzioni dell'uomo.

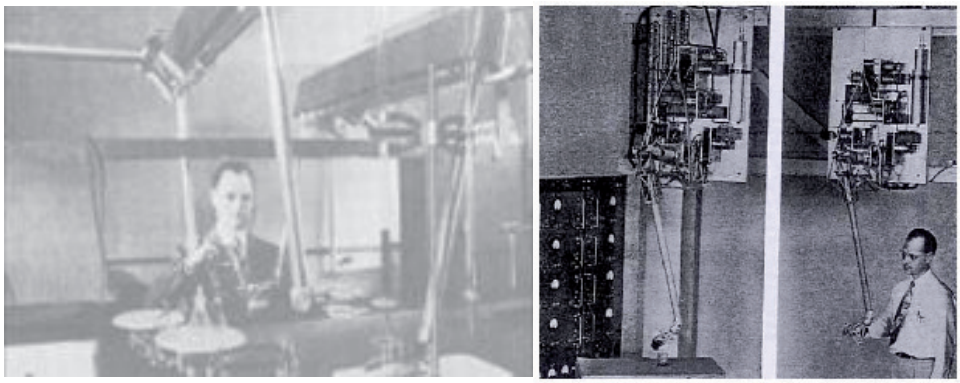


Figura 4 - I sistemi di Devol e Goertz.

Nel 1954 George Devol progetta il primo robot programmabile e conia il termine Automazione Universale (che poi sarà usato per la compagnia UNIMATION) la prima compagnia di robotica al mondo.

Nel 1959 Marvin Minsky e John McCarthy fondano il laboratorio di intelligenza artificiale al Massachusetts Institute of Technology (MIT). L'Istituto Tecnologico del Massachussetts, svolgerà successivamente un ruolo fondamentale sia come 'fabbrica di cervelli' nel campo della robotica, che come soggetto promotore di attività di ricerca e industriali.

Nel 1963 John McCarthy, fuoriscito dal MIT, fonda il laboratorio di intelligenza artificiale alla Stanford University. Nel 1964 anche il Giappone fonda i suoi primi laboratori basati sulla teleoperazione elettrica.

Nel 1965 la teoria delle trasformazioni omogenee rivoluziona la cinematica dei robot fornendo dei modelli analitici esatti per la pianificazione dei movimenti ed il calcolo delle leggi di controllo. Da questo punto in poi, le novità in campo scientifico e industriale si susseguono rapidamente. Solo per citarne alcune: nel 1967 il giappone importa il suo primo robot (il Versatran) prodotto dalla AMF; nel 1968 La Kawasaki acquista la licenza di un progetto per robot idraulici ed inizia la sua prima produzione in Giappone, Nel 1970 Victor Scheinman (alla Stanford University) progetta lo Standard Arm[5]; nel 1970 viene progettato a Waseda il primo Humanoid Robot; è di questo periodo anche l'invenzione e l'introduzione commerciale dei primi microcomputer; nel 1973 la Cincinnati Milacron commercia il T3, il primo robot industriale controllato da un minicomputer; nel 1976 braccia robotiche sono usate sulle missioni spaziali Viking 1 e 2.

3. Che cos'è e com'è fatto un robot

Un robot è «un manipolatore riprogrammabile e multifunzionale progettato per spostare materiali, componenti, attrezzi o dispositivi specializzati attraverso vari movimenti programmati per la realizzazione di vari compiti» (Robot Institute of America, 1979).

Nell'accezione della lingua italiana il termine 'robot' indica una «macchina automatica capace di svolgere, con opportuni comandi, alcune funzioni o attività proprie dell'uomo; automa meccanico».

In entrambi i casi ci si rende conto che la definizione di robot che possiamo trovare sulle fonti ufficiali, non risulta al passo con i tempi. In molti casi, mentre la visione di Isaac Asimov era oltremodo avanzata, futuribile, queste definizioni si limitano ad un concetto di sistema robotico, limitato agli aspetti di automazione industriale tipici degli anni settanta. Gli sviluppi concorrenti delle tecnologie robotiche avuti nel corso degli anni ottanta/novanta hanno tuttavia rivoluzionato il concetto di robot, trasformandolo da strumento di servizio in ambienti industriali di tipo strutturato, in sistema di utilità e collaboratore dell'uomo nel suo stesso ambiente. Come vedremo, intelligenza artificiale, optoelettronica, microelettronica e meccatronica hanno concorso a contribuire a questa trasformazione.

Ad oggi potremo definire 'robot' un sistema elettromeccanico riprogrammabile, dotato di capacità di percezione e di un intelligenza propria, predisposto per compiere un ampio numero di compiti diversi. I robot si differenziano per applicazione, struttura

ed attuazione in diverse categorie: da robot mobili a manipolatori industriale, da robot chirurgici a sistemi di addestramento.

La realizzazione ed il funzionamento di un robot vengono ottenuti tramite l'integrazione di una serie di componenti diverse così definite: parti meccaniche, sistema di trasmissione, sistema di attuazione, elettronica di controllo e rilevazione, sistema di calcolo e controllo, software comportamentale.

Le componenti meccaniche individuano le parti strutturali del manipolatore. Le parti strutturali vengono a loro volta suddivise in due categorie: i link ed i giunti. I primi costituiscono il corpo del manipolatore, i secondi le articolazioni mobili. Due sono i tipi di giunti base (rotativo e lineare) anche se sono d'uso giunti più complessi: *screws*, giunti sferici ... Alla progettazione della meccanica di un manipolatore contribuiscono specifiche prestazionali ed operative determinate dalla specifica applicazione cui il manipolatore è destinato. A seconda della specifica combinazione di giunti e di link, un manipolatore potrà appartenere a diverse categorie: seriale, seriale diramato, parallelo, ibrido.

La trasmissione si occupa di trasmettere l'energia prodotta da un sistema di attuazione alle articolazioni del robot. Esistono diverse tecnologie tramite le quali tale trasmissione può essere determinata: diretta (il motore è sull'asse del giunto), a cinghia, a cavi ...

L'attuazione invece è la sorgente di energia che fornisce movimento al robot, gli attuatori si distinguono in due classi: lineari e rotativi. I primi possono agire in senso alternato lungo una linea di movimento, i secondi ruotare attorno un asse. Inoltre l'attuazione si distingue sia per classificazione fisica del mezzo di trasmissione dell'energia (elettrica, idraulica, pneumatica) che per specifico principio di trasduzione (piezoelettrica, a induzione)

L'elettronica di un robot è forse la componente con maggiori varianti possibili. Essa si distingue in due parti: la componente di acquisizione e quella di attuazione. La prima serve a raccogliere informazioni ambientali (quali la posizione del robot, forze di contatto, accelerazioni, visione, temperatura, ...) la seconda a trasformare le indicazioni del sistema di controllo in segnali elettrici idonei a pilotare i motori. I sistemi di attuazione (*driver*) sfuttano una relazione diretta tra una variabile elettrica controllabile e l'azione meccanica da esercitare. Nel caso dei motori elettrici generalmente si controlla la relazione tra la tensione-corrente presentata al motore e la coppia/velocità di esercizio.

Il controllo di un robot si occupa di coordinare i segnali elettronici rilevati dal sistema di percezione per produrre segnali di movimento da trasdurre in opportuni comandi elettrici per i motori. Sebbene originalmente sono stati creati anche meccanismi di controllo meccanici, due categorie di controlli sono attualmente in uso: controlli elettronici e controlli digitali. La tendenza, sia per questioni di costo che di affidabilità è comunque nel digitalizzare tutti i controlli.

Il software comportamentale definisce infine il compito e le relazioni del robot con

l'ambiente circostante. Diverse famiglie di software comportamentali sono disponibili e si differenziano prevalentemente in base al campo di applicazione. Alcuni esempi includono: inseguimento di traeittorie preimpostate (automazione industriale) ovvero fornite in tempo reale (teleguida, teleoperazione), rilevazione di parametri (controllo qualità, ispezione), analisi semantica dei dati rilevati (sorveglianza, navigazione autonoma), inseguimento di fattori di merito (ausili tecnologici, *extender*, ...). Inoltre il software comportamentale include un'ampia famiglia di soluzioni analitiche/numeriche per risolvere specifici problemi di movimentazione: cinematica diretta, cinematica inversa, pianificazione di traiettorie.

4. Tendenze nello sviluppo della robotica umanoide

Sin dalla coniazione del vocabolo, il termine 'robot' è stato strettamente associato a caratteristiche di sistemi elettromeccanici di tipo antropomorfi. La stessa rappresentazione del R.U.R. raffigurava un manichino dalla forma umana. Durante gli ultimi 70 anni, narrativa e cinematografia hanno prevalentemente immaginato la figura del robot come un essere meccanico dalle sembianze umane.

L'idea di ricostruire un robot dalle forme umane, è oggi solo una delle linee di ricerca della robotica moderna: la robotica umanoide, ma ciononostante costituisce tuttoggi una delle sfide più ambiziose sia per le complessità di percezione e meccaniche insite, sia per la difficoltà di ricreare il coordinamento motorio e l'intelligenza propria degli esseri umani.

I primi esperimenti di ricostruire robot dalle forme umane risalgono alle ricerche della Waseda university dei primi anni '70. Nonostante un trentennio abbondante di ricerca nel settore, tuttavia la realizzazione di un sistema che si avvicini alle prestazioni umane è ancora lontana. I due risultati più di successo nel settore sono il robot umanoide realizzato dalla Honda e presentato nel 1998 (P3 ed ora Asimo) e il Sony Dreaming Robot, oggi alla sua 4 versione. Entrambi hanno capacità di locomozione e equilibrio, e sono in grado di eseguire dei compiti elementari in accordo a traiettorie e movimenti preimpostati.

È interessante notare che il robot Honda ha subito, durante lo sviluppo, un forte decremento delle dimensioni suggerito anche da considerazioni sull'accettabilità sociale della macchina. Al di là degli ovvi vantaggi d'ingombro, massa e conseguenti complessità di controllo e attuazione, si era registrato che l'utente umano nell'interazione con il modello P3, sebbene questo fosse di statura inferiore ad una persona media, avvertiva disagio e timore. L'attuale Asimo è considerato più accettabile e rassicurante. È altrettanto notorio che uno degli ambiziosi obiettivi (di straordinario impatto sul piano comunicativo) del progetto di robot umanoide Honda prevede di sfidare con undici robot in una partita di calcio, nel 2050, la nazionale campione del mondo in carica.

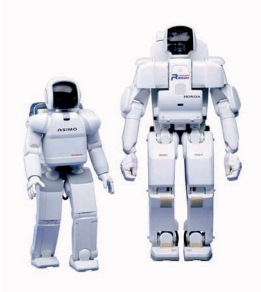


Figura 5 - Due versioni di P3 e Asimo: si noti la differenza relativa di dimensioni.

La robotica prende piede nella società negli anni ’70 come supporto alla produzione industriale. In quel periodo, l’ambiente in cui opera il robot e l’ambiente in cui opera l’uomo sono completamente separati al fine di garantire i margini di sicurezza agli operatori necessari. I primi robot inoltre operavano in ambienti completamente strutturati, ovvero dove le posizioni di tutti gli elementi con cui il robot doveva interagire erano note a priori. Successivi sviluppi della robotica, come la visione artificiale, hanno poi consentito di ridurre i vincoli imposti nell’ambiente.

Successivamente la robustezza e i ridotti rischi umani collegati all’impiego dei robot hanno indotto i ricercatori a progettare nuovi sistemi, detti di teleoperazione, in cui i robot erano capaci di trasportare in ambienti remoto e/o ostili le capacità di azione di un operatore umano. L’avvento della teleoperazione ha introdotto nel paradigma di azione dei robot una profonda trasformazione dal momento in cui l’operatore doveva operare nello stesso spazio fisico del roboc con cui interagisce.

Negli anni ’90, gli ambienti virtuali hanno ulteriormento ridotto questa distanza tra operatore e robot, immaginando e realizzando una serie di dispositivi robotici (dette interfacce afferenti) tramite i quali l’operatore risulta in grado di interagire con l’ambiente virtuale e percepirne stimoli fisici. L’uso di questi dispositivi (aptici, tattili, termici) richiede che l’operatore indossi fisicamente una componente (o tutto) il meccanismo, e che le percezioni vengano trsmesse tramite le aree di contatto. Gli ambienti virtuali arricchiscono quindi la capacità di condividere l’ambiente tra sistema robotico e uomo, con la capacità di condividere le esperienze.

Un ulteriore sviluppo di questi sistemi viene dall’intelligenza artificiale, ad oggi infatti, un’ampia serie di sistemi robotici (quali gli ausili tecnologici, i robot reattivi, i *cobots* – ovvero *collaborative robots*), consentono di condividere con l’operatore non solo l’interazione in termini di esperienza, ma anche in termini di intenzione.

A conferma di quanto presentato nell’introduzione, ove si diceva di come le macchine influenzano la nostra vita e il nostro modo di pensare, le categorie attuali di sviluppo della robotica si vanno distaccando dalla «semplice» funzione industriale, nella quale i robot svolgono compiti difficoltosi, ripetitivi, pericolosi per l’uomo, virando verso una componente di integrazione sociale e culturale.

I robot sociali, individuano una nuova applicazione della robotica destinata ad essere nel futuro uno strumento di interazione sociale. Eliminata la barriera della

sicurezza, tramite una serie accurata di norme e di certificazioni, i robot possono entrare a far parte, come già i computer hanno fatto 25 anni fa, della vita sociale. Rispetto ai computer questi ultimi sembrano avere maggiori potenzialità espressive nel fatto che possono integrare le capacità multimodali con movimento e gestualità ai primi negati.

Ad oggi la diffusione, più che lo lo sviluppo, dei robot sociali è ancora limitata, si va da alcuni esempi commerciali a risultati perlopiù sperimentali. Robot per il gioco (il Sony Aibo, Mitsubishi Wakamaru, i Lego Mindstorm), il cinema (l'animatronica) e l'assistenza agli anziani (domotica, assistive robots), sono tecnologie ormai disponibili anche se ancora poco diffuse presso il grande pubblico.

Di più recente interesse invece sono i robot per l'interazione artistica (si veda più avanti il museo delle Pure Forme), lo sport e la musica, per i quali valgono le considerazioni sulla disponibilità e diffusione fatte poc'anzi.

La funzione operativa, produttiva dei robot non è naturalmente messa in discussione ed individua un enorme settore di ricerca che necessita delle più varie competenze e specializzazioni. Per robot operativi, si intendono tutti quei robot con una specifica applicazione nell'esecuzione di un compito complesso. Questi robot solitamente presentano un elevato grado di autonomia e sono impiegati in condizioni critiche e/o pericolose. Alcuni robot operativi sono impiegati per il trasporto di materiali, il pattugliamento, la simulazione, l'aumentazione della capacità fisico-percettive (*body-extender*), lo sminamento, la coltivazione, veicoli autonomi (aerei, marini, terrestri).

5. Alcuni robot del laboratorio Percro

Il Museo Delle Pure Forme (www.pureform.org) è un sistema in cui un dispositivo robotico viene integrato con un ambiente virtuale. Un museo, composto di sale e statue, esatte copie digitali dei relativi originali, viene materializzato alla vista del visitatore e alla percezione delle sue mani. Una vera e propria esperienza artistica virtuale che, grazie alla possibilità di toccare le opere, offerta dalla tecnologia aptica, si apre a nuove esperienze e nuove utenze come quella dei non vedenti.



Figura 6 - Un'immagine dal museo delle Pure Forme, in primo piano la silhouette dell'utente con la struttura robotica indossata.

Il BodyExtender è un particolare dispositivo robotico antropomorfo indossabile che aumenta le prestazioni di forza dell'uomo. Questa struttura ha una cinematica tale da permettere all'operatore che lo indossa di camminare in avanti e lateralmente, di accosciarsi e di ruotare su se stesso e di raggiungere e muovere carichi in modo naturale, ovvero afferrandoli con organi di presa simili a pinze ma comandati direttamente dalle mani dell'operatore.

Importanti requisiti di progetto sono la trasparenza d'uso (si vuole cioè che l'operatore non sia disturbato nei suoi movimenti dalle azioni della macchina) e la flessibilità d'uso (perseguita garantendo all'operatore di poter effettuare la maggior parte dei movimenti grazie ai gradi di libertà della macchina resi il più possibile simili a quelli delle articolazioni umane ed alla distribuzione delle masse della struttura robotica che rispetta quella dell'uomo).

Il BodyExtender è un sistema a 26 gradi di libertà, costituito da un insieme modulare di attuatori elettromeccanici, che possono essere considerati alla stregua di servomotori che inseguono i movimenti dell'uomo e ne amplificano la forza. Le prestazioni degli attuatori ad elevato rendimento che costituiscono la struttura del BodyExtender consentono di sollevare fino a 200 kg.

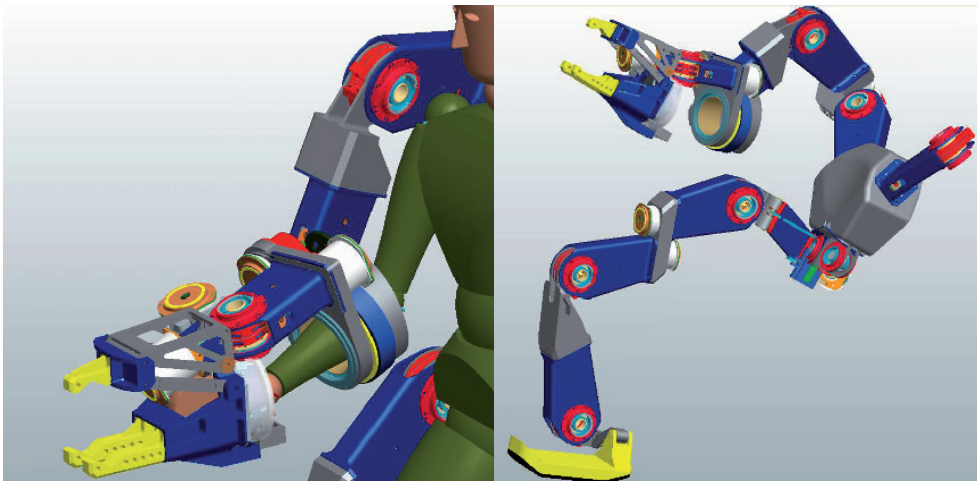


Figura 7 - Vista del BodyExtender (braccio e zampa robotica sinistra sono state nascoste alla vista per chiarezza) Si noti la struttura modulare del braccio e della zampa che utilizzano i medesimi gruppi d'attuazione. Nella figura di sinistra particolare della posizione che l'utente assume quando indossa il BodyExtender.

Note

† La presente memoria è la trascrizione delle lezioni introduttive al tema della robotica umanoide tenutesi a Cascina (Arezzo) nell'ambito di Pianeta Galileo 2006. Obiettivo del seminario è stato quello di presentare agli studenti alcuni aspetti della sempre più frequente collaborazione e coabitazione di uomini e robot.

[1] Considerevoli esempi (sempre letterari) di sofferta coabitazione fra umanità e macchine intelligenti si trovano nel romanzo di Matt Ruff, «Acqua, luce & GAS – Trilogia dei lavori pubblici», 2000, ed. Fanucci, Roma

[2] L'affascinante mitologia dei prodigi senzienti ,che qui solo accenniamo, esula dagli scopi della presente memoria. Per i prmi approfondimenti rimandiamo al volume di Mario Losano, Storie di Automi, 1990 Einaudi

[3] Il termine deriva probabilmente dalla parola ebraica gelem che significa «materia grezza», o «embrione». Esso fa la sua prima apparizione nella Bibbia (Antico Testamento, Salmo 139:16) per indicare la «massa ancora priva di forma», che gli Ebrei accomunano ad Adamo prima che gli fosse infusa l' anima. Secondo la leggenda, chi viene a conoscenza di certe arti magiche può fabbricare un golem, un gigante di argilla forte e ubbidiente, che può essere usato come servo, impiegato per svolgere lavori pesanti e come difensore del popolo ebraico dai suoi persecutori. Può essere evocato pronunciando una combinazione di lettere alfabetiche. Il Golem era dotato di una straordinaria forza e resistenza ed eseguiva alla lettera gli ordini del suo creatore di cui diventava una specie di schiavo, tuttavia era incapace di pensare, di parlare e di provare qualsiasi tipo di emozione perché era privo di un'anima e nessuna magia fatta dall'uomo sarebbe stata in grado di fornirgliela. Si vuole che nel XVI secolo un mago europeo, il rabbino Jehuda Löw ben Bezalel di Praga, cominciò a creare golem per servirsene come servi, plasmandoli nell'argilla e risvegliandoli scrivendo sulla loro fronte la parola «verità» (in ebraico emet). C'era però un inconveniente: i golem così creati diventavano sempre più grandi, finché era impossibile servirsene: il mago decideva di tanto in tanto di disfarsi dei golem più grandi, trasformando la parola sulla loro fronte in «morte» (in ebraico met); ma un giorno perse il controllo di un gigante, che cominciò a distruggere tutto ciò che incontrava. Ripreso il controllo della situazione, il mago decise di smettere di servirsi dei golem e nascose il demone nella soffitta della Sinagoga Staronova, nel cuore del vecchio quartiere ebraico, dove, secondo la leggenda, si troverebbe ancora oggi.

[4] Nel 1769, Wolfgang De Kempelen, appassionato di meccanica ma fino ad allora responsabile di attività minerarie, incaricato dall'imperatrice Maria Teresa di Vienna di sviluppare un attrazione che desse lustro alla corte. In capo a sei mesi realizzò il giocatore di scacchi. A Kempelen si possono ricondurre numerosi contributi in termini della ricerca in robotica compresa la macchina parlante. Famosa è la sua pubblicazione al riguardo: *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine* (1791).

[5] La cinematica di questo robot rimane oggi la più usata per robot industriali.

Ontologia e teoria dei sistemi: un contributo all'ingegneria del software

Carlo Scognamiglio

Dottorando presso l' Università di Roma 'La Sapienza'

1. Premessa

L'argomento che ci troviamo a discutere oggi[1] presenta una sua peculiare complessità, che deriva sostanzialmente dall'accostamento di due elementi, entrambi caratterizzati da forti vocazioni interdisciplinari: l'ingegneria del software da un lato, e la teoria dei sistemi dall'altro. L'ingegneria del software è una disciplina sviluppatasi intorno alla fine degli anni ottanta, che lascia convergere nella propria costituzione elementi di matematica, economia, sociologia, filosofia e scienze dell'informazione. Geneticamente interdisciplinare può essere considerata anche la teoria dei sistemi, a partire dalla formulazione originaria di Ludwig von Bertalanffy [1], nella quale, non a caso, al sostantivo «teoria» viene associato l'aggettivo «generale».

Per descrivere la particolare relazione tra ingegneria del software e teoria dei sistemi e fornire un'ulteriore specificazione all'ambito entro il quale ci muoveremo, ho proposto la mediazione della teoria ontologica, per dare conto delle ragioni strutturali di questa connessione.

La parola «ontologia» potrà certamente generare qualche perplessità tra i non addetti ai lavori, in quanto la rappresentazione tradizionale dell'informatica come espressione pratica e concreta dell'ingegno umano da un lato, e della filosofia come fascinoso vaneggiamento speculativo dall'altro, agisce sulla coscienza comune in maniera pervasiva.

In realtà, come è stato abbondantemente evidenziato da ricercatori come Roberto Poli, Nicola Guarino [7, 13, 14] e altri importanti studiosi in campo internazionale, l'ontologia, *come scienza delle categorie*, torna d'attualità proprio nel momento in cui siamo costretti a ragionare sulle principali «strutture» del reale (come ad esempio i rapporti parte-tutto, forma-contenuto, causa-effetto, e quant'altro) per poter costruire adeguati strumenti tecnologici che gestiscono Informazioni [3, 12, 21]. L'ontologia della tradizione filosofica si rivela estremamente vicina alle problematiche che possono sorgere nello studio dell'ontologia come tecnologia, in particolar modo, qualora facessimo nostra questa rivendicazione, in chiave anti-relativistica e anti-costruttivista.

Queste «ontologie» particolari, che servono a descrivere uno specifico dominio, hanno in verità qualche difetto. Difatti, come vedremo, rendono difficile la comunicazione tra sistemi (ad esempio, tra due scuole) che intendono differentemente lo stesso termine.

A questo punto, si è reso necessario negli ultimi anni un ritorno all'ontologia della tradizione filosofica, a partire da Aristotele fino a Nicolai Hartmann, per provare a costruire una sorta di meta-modello, che indichi in maniera il più possibile stabile le strutture categoriali degli oggetti, e che studi, in altre parole, le categorie fondamentali che caratterizzano il reale e le dimensioni dell'essere (reale o ideale; materiale, vitale, psichico, sociale). L'idea di fondo è che solo una ontologia dei fondamenti può determinare le condizioni per la costituzione del meta-modello.

Uno sviluppo del tutto particolare ma integrabile dell'ontologia è in un certo senso la teoria dei sistemi. In particolar modo per opera del suo fondatore, Ludwig von Bertalanffy, la teoria generale dei sistemi si pone come strumento di comprensione categoriale non più del modo di darsi degli oggetti, ma dei *sistemi*, ossia di quelle entità costituite da più oggetti in relazione tra loro. La scuola è un sistema, come lo è l'organismo vivente, ed entrambi sottostanno a una serie di leggi (matematicamente rappresentabili) e posseggono una serie di proprietà ricorrenti.

Descrivendo realtà sistematiche, così come processi (in quanto ogni processo si riferisce a uno o più sistemi dinamici), la teoria dei sistemi svolge una funzione ontologica, contribuendo significativamente alla 'categorizzazione' del dominio. La teoria dei sistemi indaga le proprietà delle organizzazioni indipendentemente dal livello in cui esse si trovino, ma costituisce al tempo stesso uno strumento descrittivo dei processi e delle entità complesse. Procediamo dunque a chiarire i termini del discorso.

2. Ingegneria del software e ontologia applicata

Tra gli anni cinquanta e sessanta la figura del programmatore è simile a quella dell'artigiano: egli procede nella programmazione con una metodologia fortemente empirica e poco strutturata, senza documentare problemi e soluzioni incontrate nel percorso di elaborazione, e lavorando individualmente; inoltre, è responsabile non solo della produzione ma anche della gestione e della manutenzione del software da lui prodotto. Come nel passaggio dall'artigianato all'industria, la trasformazione del software significa «industrializzazione» del processo di produzione di programmi informatici. L'attività, per quanto geniale, di un solo programmatore non è più sufficiente, e gli utenti sono molti e agiscono nel medesimo tempo. La necessità di allargare i software a numerosi utenti, induce i tecnici e gli informatici della fine degli anni sessanta a controllare in maniera più sistematica l'intero processo di produzione e utilizzo di software estremamente complessi.

L'ingegneria del software è quella branca dell'ingegneria che si interessa della realizzazione dei software, in particolare adottando una prospettiva di analisi che focalizza la propria attenzione su quella dimensione nota come *ciclo di vita* del software, inteso non semplicemente come manufatto ma come vero e proprio prodotto industriale. Tale ambito di applicazione scientifica sorge in verità dal progressivo complicarsi della quantità e composizione dei software, nonché dalle esigenze informatiche socialmente determinate.

Con gli anni si è reso necessario controllare integralmente l'intero processo di realizzazione dei software, dall'ideazione alla manutenzione, all'interno di complessi processi dove i capitali informativi rischiano di perdersi a causa di numerose variabili, come il *turn over* nei gruppi di lavoro o altri fattori. Il ciclo di vita può essere (approssimativamente) così articolato:

1. Analisi (analisi di fattibilità, analisi e modellazione del *dominio* applicativo, e analisi dei requisiti)
2. Progetto
3. Implementazione
4. Testing
5. Manutenzione
6. Documentazione

In questo quadro un particolare interesse riveste per noi la seconda parte dell'attività di analisi. Una corretta analisi, e modellazione, del *dominio* rappresenta infatti la chiave per risolvere buona parte dei problemi di implementazione e manutenzione del software. L'eccessiva soggettività con la quale le comunità di *designer* predispongono la struttura del dominio determina in molti casi seri problemi di utilizzo e integrazione del programma.

Facciamo l'esempio di un qualsiasi software che debba trovare il suo impiego nel settore educativo: qualunque sia la sua funzione, esso dovrà fondare la propria azione a partire da una piattaforma di conoscenza che descriva tutte le informazioni inerenti al dominio e ne espliciti le gerarchie. Se io volessi costruire un database del dominio *SCUOLA*, potrei scegliere ad esempio di inserire l'item LABORATORI come sottoinsieme, al pari di LEZIONE FRONTALE e LAVORO DI GRUPPO, di un item più inclusivo: ATTIVITÀ DIDATTICA. Allora direi

1) LABORATORI **_is_a_part_of_** ATTIVITÀ DIDATTICA.

In questo modo comincerei a costruire delle gerarchie e delle relazioni tra le molteplici unità informative, costruendo un'intricata rete di relazioni che non è facile gestire. Ho dunque iniziato a costruire la mia ontologia. Difatti, poniamo che io suddivida l'*item SCUOLA* in ATTIVITÀ DIDATTICA, STRUTTURE, PERSONALE, ecc.; potrei essere indotto a inserire LABORATORI sotto un albero che derivi da STRUTTURE e allora avrei

2) LABORATORI **_is_a_part_of_** STRUTTURE.

Tuttavia in tal caso, per un'elementare transizione delle proprietà, avrei che:

A) STRUTTURE **_is_a_part_of_** ATTIVITÀ DIDATTICA

oppure che

B) ATTIVITÀ DIDATTICA **_is_a_part_of_** STRUTTURE.

Il punto è invece che, nelle proposizioni 1) e 2), 'LABORATORI'è sì il medesimo termine, ma non fa riferimento allo stesso *oggetto* nella realtà.

3. L'ontologia come tecnologia

Esistono due diversi modi di intendere il ricorso all'ontologia come tecnologia, che nascono da esigenze differenti e offrono soluzioni altrettanto discordanti:

- In un primo caso, le ontologie (in tale concezione si adopera il plurale presumendo un'incontrollabile pluralità di costrutti ontologici) sono considerate come il fondamento della comunicazione tra le persone e tra i gruppi che si riconoscono in un determinato ambito culturale, linguistico, organizzativo. In tali ambiti, queste persone possono condividere elementi concettuali analoghi, simili o identici.
- In un secondo modo di considerare l'ontologia nella sua importanza in ambito di gestione delle conoscenze, l'ontologia è uno strumento teorico necessario per poter descrivere entità reali (oggetti, processi, eventi, ecc.) o meta-categorie per la modellazione della realtà (concetti, proprietà, qualità, stati, ruoli, ecc.).

La prima di queste due prospettive ha fornito e fornisce tuttora risultati certamente proficui e prodotti informatici diffusi; a tale idea dell'ontologia e del suo uso possono ricondursi, per quel che concerne l'Italia, gli indirizzi di ricerca di Nicola Guarino e Aldo Gangemi [5, 6, 7]. Gangemi, in particolare, pare intendere l'ontologia come strettamente connessa al contesto d'uso, ossia come una coerente strutturazione categoriale all'interno di uno specifico dominio, in un condiviso contesto d'uso. Tuttavia, lo stesso Gangemi è costretto a dover riconoscere i limiti di tale prospettiva. C'è il rischio infatti che questo genere di impostazione non riesca a ridurre a una le possibilità di classificazione, né a ridurre in alcun modo la libertà di interpretazione, ma consenta al massimo di costruire un contesto all'interno del quale siano possibili più contesti d'uso.

La seconda prospettiva, invece, intende individuare nella ricerca ontologica il momento di una definizione di *top categories* con validità universale, con una struttura categoriale altrettanto estendibile ad ogni dominio, attraverso un'analisi che parta sempre dall'oggettività, e facendo «parlare l'oggetto» (o il processo) capitalizza le informazioni necessarie e si costituisce come meta-modello. In questo modo, tende a raccogliere e consentire l'interscambio di differenti *database*, che pur essendo costruiti su domini diversi, si riferiscono sempre ad una realtà oggettiva che è una, ed estremamente complessa.

L'attribuzione di tale funzionalità, nell'ambito dell'integrazione, allo studio dell'ontologia non deve però indurre nell'errata conclusione che esso debba essere limitato a tale compito; infatti non ci serviamo dell'ontologia unicamente quando ci troviamo di fronte a sistemi eterogenei che abbiamo bisogno di mettere in comunicazione. Al contrario, è proprio questa peculiarità dell'ontologia a renderla uno strumento utile nella stessa progettazione originaria di un *database*, fondata su criteri generali e aperti dunque a possibili integrazioni e modifiche. Sulla base di questa seconda impostazione

sono sviluppate in particolare le ricerche di Roberto Poli [13, 14].

Ad ogni modo, le principali potenzialità applicative della ricerca ontologica sono: costruzione e integrazione di *database*, traduzioni automatiche, motori di ricerca, *thesauri*. Tra *database* possono verificarsi delle situazioni di disaccordo o totale incomunicabilità. Ciò può dipendere da un diverso modo di costruire gerarchie e piattaforme concettuali tra due o più comunità differenti (disaccordo tra comunità), oppure a causa della mancata esplicitazione della comunicazione latente, per cui ad uno stesso termine corrispondono diverse entità reali (disaccordo formale). Soltanto un meta-modello, qualora fosse realizzato, potrebbe determinare dunque un processo di integrazione tra più banche-dati. Similmente una piattaforma lessicale, semantica e categoriale potrebbe fare da supporto a tutti i software destinati alle traduzioni automatiche e ai *thesauri*.

4. Problematiche interne alla gestione delle Intelligenze Artificiali e contributo dell'ontologia

L'anno zero dell'informatica si colloca cronologicamente negli anni delle prime esperienze e dibattiti intorno alle intelligenze artificiali, che videro nel congresso di Darthmouth del 1956 la principale spinta propulsiva, che fin da i primi passi propose al mondo della ricerca i medesimi dubbi: sarà possibile realizzare un sistema informatico realmente «intelligente», nel senso tutto umano attribuito a questo concetto? Certamente, qualora fornito delle informazioni necessarie, qualunque software è in grado di superare prove cognitive molto più complesse di quanto l'uomo risulti in grado di fare. Tuttavia, è possibile costruire un software in grado di comunicare padroneggiando tutti gli aspetti semantici dei processi di comunicazione, e di apprendere dall'esperienza?

I filosofi Hubert Dreyfus e John Searle [4, 20] rappresentano alcune delle voci più autorevoli a questo proposito. Ciò che essi mettono in evidenza è la difficoltà, per un software, così come per una qualsiasi macchina, di acquisire una «base di conoscenza» o «senso comune» che consenta di comprendere tutti quegli elementi del linguaggio umano latenti nella comunicazione, che l'uomo è invece in grado di interpretare.

Secondo Dreyfus, in particolare, per poter acquisire quella base di conoscenza, un'intelligenza artificiale dovrebbe essere in grado di gestire le seguenti funzioni:

1. costruire una conoscenza di fondo sulla quale formare l'apprendimento
2. organizzare il processo di apprendimento
3. individuare la strategia per provocare l'induzione
4. gestire e garantire l'acquisizione di dati sensoriali.

La particolare complessità di tali obiettivi induce Dreyfus a concludere pessimisticamente il proprio ragionamento, propendendo per un probabile insuccesso nel perseguire quel risultato.

Naturalmente, negli ultimi anni abbiamo assistito a numerosi progressi nel campo delle tecnologie dell'automazione e dell'informazione. Eppure, in quel cattivo presagio

di Dreyfus sembra annidarsi un'ombra di verità [11, 19]. In effetti, pur riconoscendo molto distante e improbabile la prospettiva della realizzazione di un'intelligenza artificiale dotata di senso comune, è possibile provare a migliorare alcuni problemi che di consueto sorgono nella gestione dei sistemi esperti. Questo contributo ci viene fornito proprio da una diversa storia della filosofia occidentale, quella tradizionalmente indicata come «mitteleuropea».

A partire dall'importanza attribuita allo studio dell'oggetto (*intenzionato*) da Franz Brentano e dalla ontologia formale di Edmund Husserl, possiamo certamente indicare nel percorso che va dalla fenomenologia all'ontologia l'itinerario che conduce alla costituzione dell'ontologia critica di Nicolai Hartmann [8, 15, 16, 17, 18], principale riferimento di questa nostra rivalutazione della tradizione filosofica mitteleuropea.

Nella sua corposa e sistematica opera di problematizzazione e rielaborazione dell'ontologia, tradottasi nella stesura di un'imponente collezione di pagine filosofiche di intensa e stringente argomentazione teoretica, Nicolai Hartmann propone una concezione della realtà articolata in 'strati', in base alla quale il mondo si presenta costituito da più strati sovrapposti, messi reciprocamente in relazione da leggi, e governati da differenti strutture categoriali.

All'interno di *ciò che è chiamato sommariamente «natura»*, occorre porre una chiara distinzione tra ciò che è vivente e ciò che non lo è, cioè tra l'*organico* e l'*inorganico*. Analogamente, *in ciò che è chiamato «spirito»* possiamo tracciare una distinzione tra i fenomeni psichici e i contenuti obbiettivi dati dalla vita comunitaria degli uomini (per esempio: linguaggio, tecnica, scienze, diritto, ecc.).

Passiamo così da un'iniziale idea dualistica della realtà ad una concezione «tetrastratificata». Hartmann, infatti, ritiene che gli 'strati' che costituiscono il mondo reale intreccino tra loro delle particolari relazioni: lo strato della materia (fisico) è la base di tutti gli altri e sussiste indipendentemente da essi; il secondo strato è quello degli esseri viventi (organico), che poggia su quello materiale, ma al tempo stesso se ne distingue. Nella vita degli esseri organici le leggi dello strato precedente continuano ad essere valide, ma sorgono nuove peculiarità, relative all'ambito dello sviluppo, della formazione e dei cicli vitali di tutti gli esseri viventi. Il terzo strato è quello della psichicità, comune a uomini e animali, che per manifestarsi ha sempre bisogno di un individuo vivente, quindi degli strati precedenti, ma a questo stadio della realtà troviamo dei fenomeni e delle «leggi» estranee ed irriducibili a quelle degli strati precedenti, che questa volta non si conservano nel successivo, pur rimanendo per esso fondamentali. L'ultimo strato è quello che concerne le peculiarità dell'essere umano (spirituale), le quali fanno in primo luogo riferimento alla spontaneità e alla libertà, *categorie* queste, estranee ai precedenti strati di realtà.

Si tratta di una teoria complessa, che non possiamo sviluppare in questa sede. Basti sapere che l'idea dei livelli di realtà, unitamente alla enumerazione delle *top categories* può rappresentare un punto di riferimento importante, ovviamente da rivedere e su cui sperimentare, per provare a strutturare griglie informative (anche di domini circoscritti)

ontologicamente fondate.

5. La teoria generale dei sistemi

Proviamo ora a esaminare il contributo offerto dalla teoria dei sistemi alla descrizione ontologica di cui abbiamo fornito i principi fondamentali.

Nel suo volume del 1967, *Teoria generale dei sistemi*, ma già in diversi scritti pubblicati nei decenni precedenti, Ludwig von Bertalanffy indica alcuni referenti culturali e filosofici della sua teoria, nelle diverse ramificazioni del sapere. Bertalanffy rinviene in alcuni concetti chiave del pensiero filosofico le premesse della sistemica, individuandoli nella metafisica di Cusano, nella dialettica di Hegel e Marx, nella concezione della storia di Vico, nella elaborazione gestaltica di Köhler. Passando dalle premesse alle contemporanee ricerche in parte compatibili con la teoria dei sistemi, vengono segnalate la cibernetica di Wiener, la teoria dell'informazione di Shannon e Weaver, e la teoria dei giochi di von Neumann e Morgenstern.

La novità della teoria dei sistemi non consiste nello studio dei sistemi in quanto tali. Infatti l'analisi delle parti di un tutto o di un insieme di elementi in relazione non costituisce alcuna innovazione né di contenuto né di atteggiamento scientifico. Il nuovo paradigma consiste invece nello studio del sistema come entità ulteriore alla relazione tra le parti. In altre parole, ciò vuol dire che le caratteristiche costitutive di un sistema non sono spiegabili a partire dalle caratteristiche delle parti isolate. Il sistema ha una sua realtà ontologica, una sua legalità specifica. Lo scopo di tale ambito di studi è quello di stabilire dei principi applicabili ai sistemi in generale oppure alle loro sottoclassi (sistemi chiusi o aperti), di elaborare le tecniche per condurre a un loro studio appropriato, e di applicare entrambi i risultati a casi concreti.

La condivisione di proprietà generali dei vari sistemi possibili permette di individuare isomorfismi tra sistemi in domini diversi. Nella biologia, come nella sociologia, vi sono organizzazioni, e la teoria dei sistemi è in sostanza una teoria delle organizzazioni.

Le caratteristiche comuni delle organizzazioni sono rinvenibili in nozioni comunemente considerate come quelle di totalità, crescita, differenziazione, ordine gerarchico, ascendenza, controllo, competizione, ecc.

Nell'approssimativa, ma efficace, classificazione dei sistemi proposta da K. E. Boulding [2] troviamo un sistema di descrizione del reale che ricorda la teoria degli strati di Hartmann:

1. *Schemi*: sono quei sistemi dotati di strutture statiche come i cristalli o gli atomi.
2. *Meccanismi*: sono i sistemi meccanici artificiali (come gli orologi) o naturali (come il sistema solare), la cui funzione al tempo t_1 dipende sempre da quella al tempo t_0.
3. *Sistemi cibernetici*: prevedono meccanismi di controllo e retroazione, come i servomeccanismi o i meccanismi omeostatici.

4. *Sistemi aperti*: sono tutti quei sistemi che manifestano capacità di scambiare materia con l'ambiente e operare producendo o distruggendo strutture con i propri materiali. Esempio ne sono il fuoco e tutti gli organismi viventi.
5. *Organismi inferiori*: sistemi «simili a piante», nei quali si assiste a una progressiva divisione del lavoro negli organismi.
6. *Animali*: sistemi al alta incidenza del trasporto di informazione, con capacità di apprendimento e inizio della coscienza.
7. *Sistemi che trattano simboli*: uomini e società.
8. *Sistemi simbolici*: sistemi costituiti esclusivamente da simboli, come linguaggio, logica, scienze, ecc.

Lo scopo di Bertalanffy è di natura prettamente filosofica. Il sistema è un'entità, comprensibile in un quadro ontologico come una struttura categoriale. Attraverso la categoria SISTEMA lo scienziato è in grado non tanto di costruire analogie, ma di constatare delle *omologie*: «si tratta di una corrispondenza formale che si fonda nella realtà, nella misura in cui quest'ultima può essere considerata come costituita da 'sistemi' di ogni tipo»[2]. Bertalanffy si spinge anche oltre, riallacciandosi allo stesso Hartmann: «la teoria generale dei sistemi dovrebbe sostituire, nella sua forma più sviluppata, quella che si è soliti indicare come 'teoria delle categorie' (N. Hartmann, 1942) e la dovrebbe sostituire con un sistema esatto di leggi logico-matematiche[3]. Matematizzando dunque le deduzioni della sistemica, Bertalanffy deduce le seguenti proprietà:

1) Proprietà dell'accrescimento:

$$\frac{dQ}{dt} = a_1 Q$$

L'accrescimento del sistema è direttamente proporzionale al numero degli elementi presenti (è una proprietà che può valere in biologia, ad esempio nell'accrescimento individuale di certi batteri, così come nell'accrescimento di certe popolazioni vegetali. Il corrispettivo in sociologia è la legge di Malthus, per la quale il ritmo delle nascite è superiore al ritmo delle morti. In caso di costante negativa a_1 abbiamo la funzione esponenziale decrescente, come nel decadimento radioattivo.

2) Proprietà della competizione:

Ogni totalità si fonda sulla competizione tra i suoi elementi presuppone la «lotta tra le parti» (qui Bertalanffy fa riferimento all'equazione allometrica, una formulazione matematica in base alla quale una caratteristica Q_1 può essere espressa come una potenza che è funzione di un'altra caratteristica. C'è sempre una relazione nei ritmi d'accrescimento tra le parti interne a un sistema).

3) Proprietà della meccanicizzazione:

I complessi possono essere caratterizzati da globalità (quando le variazioni in ciascun elemento dipendono da tutti gli altri elementi) o da sommabilità fisica (come in quei

complessi definibili «cumuli», per i quali la variazione del complesso è la somma delle variazioni dei suoi elementi singolarmente presi). Il progresso di un sistema consiste nella specializzazione, cioè nella trasformazione di un comportamento inteso come globalità a uno inteso come sommabilità (meccanicizzazione).

4) Proprietà della centralizzazione:
Una progressiva segregazione è spesso connessa a una progressiva centralizzazione, la cui espressione è data dall'evoluzione di una parte primaria. Tale principio coincide dunque con quello di progressiva individualizzazione. Un «individuo» è un sistema centralizzato.

5) Proprietà della gerarchizzazione:
I sistemi sono spesso strutturati in modo tale che i loro singoli membri sono, a loro volta, dei sistemi di ordine immediatamente inferiore.

6) Proprietà dell'equifinalità (relativa ai sistemi aperti):
I sistemi aperti – che scambiano cioè materia con l'ambiente circostante e che possono operare nell'ambiente producendo e distruggendo strutture –, tendono a uno stato indipendente dal tempo, chiamato 'stato stazionario'. Non è tuttavia da confondere lo stato stazionario con l'equilibrio, in quanto nel primo il sistema è capace di fare del lavoro. Lo stato stazionario è quello stato in cui il sistema rimane stabile per quanto riguarda la sua composizione anche se si svolgono in esso processi irreversibili continui.

7) Principio dell'apprendimento:
In un sistema aperto sono possibili, da un punto di vista termodinamico, un aumento dell'ordine e una diminuzione dell'entropia, grazie all'informazione, che si definisce come «entropia negativa». Un sistema aperto può essere retro-attivo e raggiungere così uno stato di organizzazione più elevata grazie all' «apprendimento».

I sistemi hanno inoltre tre possibili finalità: a) possono tendere asintoticamente a uno stato stazionario (anche in caso di perturbazione, il sistema tende a ristabilire un equilibrio), b) possono non giungere mai a uno stato stazionario; c) possono avere oscillazioni periodiche.

6. Conclusioni

Non sono mancate negli ultimi anni le sperimentazioni per la cattura, in un modello 'ontologico', dell'informazione latente e per la costruzione di una piattaforma di categorizzazione destinata fornire supporto concettuale a tutte le fasi di analisi del dominio di un software e di formalizzazione del capitale informativo. Farò riferimento all'importante esperienza da me effettuata nell'ambito del gruppo di ricerca ITIA del CNR nel periodo 2003-2004 – gruppo composto da Giliola Negrini [9, 10], Leonardo Meo Evoli, Tamara Farnesi e con la collaborazione del filosofo Roberto Poli. In questo gruppo di lavoro si è sperimentato non solo per la costruzione del Clasthes, un importante software di catalogazione, ma anche per l'elaborazione di una metodologia

di lavoro, nella procedura 'ontologica', così sintetizzabile:

1. Individuazione dei termini specifici del campo d'esame. *Si tratta di una fase di «ricognizione», ricorrendo a tutti gli strumenti messi a disposizione dalla bibliografia inerente il dominio, di tutti i termini, con particolare attenzione a quelli specialistici, inerenti il dominio in esame.*
2. Reperimento delle più chiare e accreditate definizioni. *Attraverso adeguata analisi delle relazioni e delle definizioni in oggetto, risulta necessario liberarsi dell'informazione erronea e accogliere le informazioni più accreditate.*
3. Lettura analitica delle informazioni mediante categorie ontologiche. *Attraverso la piattaforma categoriale debitamente predisposta occorrerà discriminare sistemi, eventi, oggetti e processi, e studiare di ciascuno la composizione ontologica.*
4. Individuazioni di eventuali anomalie.
5. Adeguazione e consolidamento del modello ontologico. *Il modello viene adeguato alle novità introdotte dalle anomalie incontrate o consolidato nella sua efficacia.*

Il passaggio successivo dovrà invece condurci in una fase di formalizzazione delle informazioni che possa renderle utili all'informatico, che dovrà poi manipolare i materiali per la costruzione della banca-dati o del software in senso lato. In questo senso, lo strumento di categorizzazione ideato da Roberto Poli, *Alvìs*, oltre all'ambito descrittivo e all'ambito formale, prevede un ambito di lavoro di formalizzazione, cioè di codificazione dei risultati dell'analisi ontologica.

NOTE

[1] La lezione-incontro si è svolta a Livorno il giorno 8 novembre 2006 presso l'I.T.I.S. Galilei.

[2] cfr. [1], p. 139

[3] *Ibidem.*

BIBLIOGRAFIA

[1] Bertalanffy L. von, *Teoria generale dei sistemi*, Mondadori, Milano 2006.

[2] Bouldin K. E., *The organizational revolution*, Harper & Row, New York 1953.

[3] Clancey W. J., The knowledge level reinterpreted: modelling socio-technical systems, *International Journal of Intelligent Systems*, 8 (1993), pp. 33-49.

[4] Dreyfus H., C*he cosa non possono fare i computer? I limiti dell'intelligenza artificiale*, Armando, Roma 1988.

[5] Gangemi A., Guarino N., Masolo, C. e Oltramari A. Understanding Top-Level Ontological Distinctions. Paper presented at the Seventeenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-01). Workshop on Ontologies and Information Sharing, 4-5 August, 2001, Seattle, Washington.

[6] Gangemi A., Guarino N. e Oltramari A., Conceptual analysis of lexical taxonomies: the case of WordNet top-level, Proceedings of the international conference on Formal Ontology in Information Systems, October 17-19, 2001, Ogunquit, Maine, USA, pp. 285-296.

[7] Guarino N., Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation, *International Journal for Human-Computer Studies*, 43, 1995, pp. 625-640.

[8] Hartmann N., *Der Aufbau der realen Welt. Grundriss der allgemeinen Kategorienlehre*, Walter De Gruyter, Berlino 1940.

[9] Negrini G., Clasthes: a thesaurofacet creator, *Library Science with a slant to Documentation and Information Studies*, 31, 1994, pp. 1-12

[10] Negrini G., Clasthes, un software per una banca dati terminologica a fini documentari (Clasthes, a software for a documentary terminological databank*)*, *Lexicon Philosophicum*, 1994, pp. 33-57.

[11] Newell A., *The knowledge level*, *Artificial Intelligence*, 18, 1982, pp.87-127.

[12] Partridge C., *The role of ontology in integrating semantically heterogeneous databases*, Technical Report 05/02, LANDSEB-CNR, Padova 2002.

[13] Poli R., *Alwis: ontology for knowledge engineers*, Phd Thesis, Utrecht 2001.

[14] Poli R. e Simons P., *Formal Ontology*, Kluwer, Dordrecht 1996).

[15] Scognamiglio C., *Biografia e bibliografia di Nicolai Hartmann*, www.giornaledifilosofia.net (2003).

[16] Scognamiglio C., Introduzione a *Der Aufbau der realen Welt* di Nicolai Hartmann, *Quaderno di filosofi e classici*, http://www.swif.uniba.it (2003).

[17] Scognamiglio C., *La processualità del reale nella ricerca ontologia di Nicolai Hartmann*, www.filosofia.it (2003).

[18] Scognamiglio C., *Sulla recente relazione tra ontologia e knowledge engineering*, www.giornaledifilosofia.net (2006).

[19] Stringa L., *Macchine e comportamento intelligente*, in AA. VV., *Capire l'artificiale. Dall'analogia all'integrazione uomo-macchina*, a cura di M. Negretti, Torino, Bollati Boringheri, 1990.

[20] Searle J. R., *Menti, cervelli e programmi. Un dibattito sull'intelligenza artificiale*, Milano, Clup-Clued, 1984.

[21] Takagaki K. e Wand Y., A*n object-Orientend Information Systems Model Based on Ontology*, in, *Object Oriented Approach in Information Systems,* a cura di F. Van Assche, B. Moulin e C. Rolland, pp. 275-296, Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1991.

Fantascienza e filosofia della mente*

Marco Salucci

Facoltà di Psicologia, Università di Firenze
Liceo Scientifico 'P. Gobetti', Bagno a Ripoli, Firenze

1. Esperimenti mentali

Se vi dicessi che sto per raccontarvi una storia in cui compaiono robot, computer, pipistrelli, scienziati del cervello, zombi ed extraterrestri pensereste che stia per raccontarvi una storia di fantascienza: quelli appena citati sono infatti i personaggi tipici di molte storie di fantascienza. Ma così come può accadere di sbagliarsi nel credere che Chinatown si trovi in Cina perché si incontrano solo cinesi, così vi dico che vi state sbagliando e che non sto per raccontarvi una storia di fantascienza ma di filosofia: pipistrelli, robot, zombi ecc. popolano infatti parte del dibattito filosofico contemporaneo, più esattamente quella parte che va sotto il nome di filosofia della mente.

Nel tentativo di fornire una spiegazione naturale dei fenomeni mentali ogni epoca ha utilizzato le sue metafore. A seconda dello stato delle conoscenze scientifiche e delle disponibilità tecniche l'attività mentale è stata paragonata volta a volta a una secrezione del cervello, al vapore di una locomotiva, a una centrale telegrafica o telefonica, a un computer. Da una certa epoca in poi, tuttavia, il paragone mente/computer ha cominciato a divenire qualcosa di più di una semplice metafora. Dalla metà del XX secolo, quando ancora l'uomo comune chiamava, in modo significativo, «cervelli elettronici» i computer e gli addetti ai lavori «cibernetica» la scienza dell'intelligenza artificiale, tanto il mondo della fantascienza, da sempre dominato dai marziani, quanto il dibattito filosofico sulla mente, da sempre dominato dai concetti di anima e di spirito, hanno cominciato a popolarsi di robot e di computer. Una teoria molto diffusa – il funzionalismo - ha anzi esplicitamente sostenuto che la mente è letteralmente un programma per computer, rendendo così l'ultima metafora un serio programma di ricerca laddove, che io sappia, non è accaduto nulla di simile per la metafora del fumo della locomotiva.

Hilary Putnam, uno dei padri fondatori della contemporanea filosofia della mente (ambito al quale limiterò il più possibile l'esposizione che segue) è colui che più di ogni altro ha immaginato situazioni fantascientifiche per discutere antiche e serissime questioni filosofiche: non si può sperare niente di meglio delle sue parole per entrare nel nostro tema.

> Chiunque abbia passato molte ore (ben spese o mal spese?) della propria

> fanciullezza a leggere storie di missili e di robot, di androidi e di telepati, di civiltà galattiche e di macchine del tempo, sa benissimo che i robot (macchine ipotetiche che simulano il comportamento umano, spesso con sembianze almeno approssimativamente umane) possono essere buoni o tremendi, amici fedeli dell'uomo o suoi acerrimi nemici. I robot possono essere esemplari o pateticamente buffi: incuterci sbigottita ammirazione coi loro poteri sovrumani […] oppure divertirci con il loro comportamento ingenuo e sempliciotto. Ci sono stati robot innamorati, robot impazziti […] robot zelanti fino all'irritazione. Almeno nella letteratura fantascientifica, dunque, un robot può essere 'cosciente', il che significa […] avere sensazioni, pensieri, atteggiamenti, tratti caratteriali. Ma è veramente possibile? E se lo è, quali sono le condizioni necessarie e sufficienti? E perché noi filosofi dovremmo comunque occuparcene? […] La mia speranza [è] che il problema della mente delle macchine si dimostrerà in grado di offrire, almeno per qualche tempo, un approccio nuovo e stimolante a questioni decisamente tradizionali di filosofia della mente. […] Sia Oscar uno di questi robot, e immaginiamo che esso abbia la 'sensazione' del rosso. Oscar ha la sensazione del rosso? […] Oscar vede qualcosa? Pensa, sente qualcosa? È vivo? È cosciente? [13, pp. 416 e 425]

La fantascienza è il genere cinematografico che si presta maggiormente all'incontro fra cinema e filosofia, il che, ovviamente, vale anche per la fantascienza come genere letterario. Il luogo in cui fantascienza e filosofia si incontrano è quello degli esperimenti di pensiero o esperimenti mentali: essi consistono nel provare a immaginare che cosa accadrebbe se si verificassero certe condizioni così e così. I racconti di fantascienza fanno uso in modo caratteristico di condizioni controfattuali, cioè di condizioni immaginarie in cui qualche aspetto della realtà ordinaria viene significativamente mutato. Sovente la situazione immaginata ha lo scopo di mettere alla prova una teoria o un'ipotesi ed assume così il valore di un esperimento, da cui, appunto, la locuzione «esperimento mentale». In filosofia si fa spesso ricorso a esperimenti mentali poiché la filosofia spesso – a torto o a ragione – prescinde o oltrepassa i confini di ciò che – contingentemente o in linea di principio – è empiricamente sperimentabile. Tuttavia anche la scienza, e più spesso di quanto si pensi, usa la tecnica degli esperimenti mentali. Citerò solo uno dei casi più celebri, ma tanto più significativo in quanto sta esattamente alle origini della scienza moderna ed è stato elaborato precisamente da uno dei suoi padri fondatori: Galileo Galilei. Nel cercare prove per sostenere che un corpo in movimento si muove, in assenza di attrito, all'infinito – e con ciò per distruggere uno dei fondamenti della millenaria fisica aristotelica – Galilei non poteva ricorrere a un esperimento reale, l'unico possibile sarebbe stato un viaggio nello spazio. Egli aveva osservato però che il movimento di una palla su una superficie, a parità di altre condizioni, dura tanto più a lungo tanto più la superficie su cui si muove è levigata. Così si spinse a immaginare che se la superficie fosse stata perfettamente levigata il movimento della palla sarebbe durato all'infinito[1].

2. Da *Star Trek* a Descartes

Da quanto si è detto è facile capire come sia impossibile citare i film di fantascienza che si fondano su esperimenti mentali dal momento che tutti, per definizione, lo fanno. Ma qualcuno andrà comunque citato, almeno allo scopo di documentare quanto vado dicendo.[2]

Immaginiamo che esista un macchinario in grado di analizzare il mio corpo atomo per atomo e quindi di compilare un manuale di istruzioni e una lista dei materiali necessari per costruire il mio corpo (un manuale e una lista del genere già esistono in natura e sono contenuti nel DNA). Immaginiamo poi che manuale e lista vengano trasmessi via radio all'altro capo del mondo e che là il mio corpo venga ricostruito esattamente come il mio atomo per atomo. La domanda è: il mio «gemello» agli antipodi sono ancora «io»? Voglio dire: io sono «lui»? Drammatizziamo ulteriormente: dopo la «costruzione» del mio gemello antipodiano io vengo distrutto. La domanda è: io sono morto o continuo a vivere nel mio gemello? Risponderete: il gemello è un altro, poiché l'io originale è stato distrutto. Immaginiamo allora che invece di essere distrutto senza troppi scrupoli venga smontato atomo per atomo, imballato in apposite scatole (la scatola degli atomi di carbonio, quella degli atomi di azoto ecc.) e spedito agli antipodi insieme al manuale di istruzioni. Là vengo «rimontato» utilizzando il materiale originario. Sono ancora io? Penso che dovreste rispondere di sì e che sarebbe come risvegliarsi dopo un profondo sonno, un po' come risvegliarsi dopo un'ibernazione Ma allora vi chiedo: dov'è la differenza fra questa situazione e quella in cui avevo un gemello antipodiano? Solo nel materiale con cui sono stato ricostruito, che, in un caso, è quello originario? Certamente no: non ci può essere nessuna differenza fra due atomi di carbonio, uno trovato qui e l'altro agli antipodi. Quindi se ricostruire me agli antipodi è ricostruire *me*, allora anche ricostruire il mio gemello deve essere ricostruire *me* (oppure ciò che fa la differenza fra le due situazioni è la mera distinzione numerica?)

Il problema filosofico con cui abbiamo avuto appena a che fare è quello dell'identità personale, già discusso da Locke e da Hume nel XVII sec., che nasce dalla grande difficoltà di reperire criteri che permettano di definire l'identità di una persona nel tempo e nello spazio. I film in cui è presente una questione simile sono – l'avrete già indovinato – quelli della serie di *Star Trek* le astronavi della quale sono equipaggiate con una macchina per il teletrasporto[3]. La macchina per il teletrasporto, immaginata per soddisfare le necessità di spostarsi nello spazio potrebbe però anche permetterci di viaggiare nel tempo: se la macchina fosse conservata per mille anni e ricostruisse un altro me stesso fra mille anni. Ma, un momento … avremmo allora con ciò risolto anche il problema dell'immortalità? Bhè, sì, fintanto che sarà conservato il manuale d'istruzioni per ricostruire me stesso potrò essere ricostruito dopo ogni mia morte. Mi rimproverate di correre troppo con la fantasia? Accetto tale rimprovero, ma non da tutti: vorrei ricordare, senza nessun intento irriverente, che la lettera originaria del cristianesimo, più che l'immortalità dell'anima, promette la resurrezione dei corpi (e,

mediante questa, la resurrezione della persona e non di un mero zombi). Forse il Dio del cristianesimo provvederà alla resurrezione dei corpi consultando il manuale di istruzioni per la «costruzione» di ciascun essere umano? Vi ricordo che ancora nel XVIII secolo Dio veniva chiamato con appellativi quali «il grande architetto», «il grande ingegnere», «il grande matematico», «il grande orologiaio». Con queste ultime questioni abbiamo menzionato un problema, sì, religioso, ma che è stato a lungo un problema filosofico: per tutti i mille anni in cui filosofia e teologia andavano di pari passo[4].

Facciamo adesso però un passo verso il tema che ho scelto di trattare più in dettaglio. Racconta un saggio cinese: «Ieri notte Chuang Tzu ha sognato di essere una farfalla svolazzante e ignara di essere Chuang Tzu. Al risveglio si è accorto con stupore di essere Chuang Tzu. Adesso non sa più se è Tzu che ha sognato di essere una farfalla o se è una farfalla che sogna di essere Tzu». Che prove avete, voi che leggete queste righe, di avere veramente un libro fra le mani e di non essere vittime di una perfetta illusione. In realtà potreste essere un cervello in una vasca piena di liquido nutriente e collegato a un computer che stimola i vostri neuroni in modo da farvi credere che state leggendo un libro. L'associazione con il film *Matrix* è scontata, ma non è scontata, perché nota solo agli addetti ai lavori quella con un saggio del filosofo americano Putnam il quale in *Cervelli in una vasca*, appunto, vi sfida a dimostrare che non siete cervelli in una vasca (non è facile vincere tale sfida, ma Putnam ha scritto il suo saggio perché pensa di averla vinta)[5]. Un problema strettamente connesso al precedente è quello che aveva in mente Descartes (Cartesio) quando si chiedeva (più o meno): «cosa mi garantisce che quei cappelli e quei mantelli che vedo dalla mia finestra passare giù per strada coprono degli uomini veri e non degli automi?». Descartes pensava di possedere un criterio per rispondere a tale domanda: gli uomini agiscono e parlano in modo creativo, gli automi in modo ripetitivo.

Secondo Descartes il pensiero umano esibisce una caratteristica che non può essere ricondotta a una meccanica «disposizione d'organi»: questa caratteristica è l'originalità, o creatività, che si manifesta soprattutto nel linguaggio. Poiché gli uomini sono in grado di dire e capire frasi che non hanno mai detto o udito in precedenza e poiché, invece, un meccanismo che parlasse lo potrebbe fare solo ripetendo espressioni che ha già interiorizzato, allora bisogna concludere che nell'uomo è presente un principio immateriale con caratteristiche di originalità e creatività. Questo principio è per Descartes l'anima.

> Mi ero qui fermato a far vedere in modo particolare che, se ci fossero macchine aventi organi e figura di scimmia o di altro animale privo di ragione, noi non avremmo nessun mezzo per riconoscere la differenza, mentre, se ve ne fossero che somigliassero al nostro corpo e imitassero le nostre azioni quanto meglio fosse possibile, noi avremmo pur sempre dei mezzi certissimi per riconoscere che esse non sono affatto per ciò dei veri uomini. Il primo è che non potrebbero mai valersi di parole o di altri segni, componendoli come noi facciamo per esprimere agli altri i nostri

> pensieri: poiché si può ben immaginare una macchina che profferisca delle parole, e anzi ne profferisca alcune riguardanti azioni corporali che producano qualche alterazione nei suoi organi, come domandare qualcosa se toccata in una parte, o gridare che le si fa male se toccata in altra parte, e simili cose; ma non già che essa disponga le parole diversamente per rispondere a tono a tutto quello che uno può dirle, come, invece saprebbe fare anche l'uomo più idiota. Il secondo mezzo è che, anche se facessero alcune cose ugualmente bene e anzi meglio di noi, esse inevitabilmente sbaglierebbero in alcune altre, e si scoprirebbe così che non agiscono per conoscenza, ma solo per una disposizione dei loro organi. Soltanto la ragione, infatti, è uno strumento universale, che può servire in ogni specie di circostanze e tali organi, invece, hanno bisogno di una particolare disposizione per ogni azione particolare: sì che è come impossibile che ce ne siano tanti e così diversi in una macchina da farla agire in ogni occasione nel modo che agiamo noi con la nostra ragione [6, pp. 40-41]

Ciò significa che i robot e i computer non possono pensare. Ma allora le storie di fantascienza che hanno come protagonisti robot e computer sono solo fantastiche. Non esattamente: come dicevo all'inizio occorre aspettare la seconda metà del XX secolo perché l'ipotesi di robot e computer pensanti potesse essere presa in seria considerazione.

3. *AI, Blade Runner* e *2001 Odissea nello spazio*

Il film *A.I. Intelligenza artificiale* (2001) di S. Spielberg realizza un antico progetto di S. Kubrick (il regista di *2001 Odissea nello spazio*) a sua volta ispirato a tre racconti dello scrittore di fantascienza B. W. Aldiss[6]. La storia può essere considerata una versione fantascientifica di Pinocchio (e le citazioni del Pinocchio di Walt Disney sono esplicite). In un futuro indeterminato, nel quale la tecnologia è avanzatissima ma le risorse ormai limitate, il figlio dei coniugi Swinton, Martin, si ammala di una male incurabile e viene ibernato in attesa che la scienza trovi un rimedio. I genitori Henry e Monica vengono selezionati dal professor Hobby per sperimentare un nuovo modello di robot bambino in grado non più soltanto di simulare emozioni ma di provarle veramente e quindi in grado di amare i suoi «genitori» adottivi. Il robot bambino, David, fa l'ingresso nella vita della coppia Swinton dove, in breve tempo, riesce a vincere l'iniziale diffidenza di Monica. Tanto sono indistinguibili l'aspetto e i comportamenti di David da quelli di un bambino vero che Monica gli si affeziona. Da parte sua, David è programmato per amare la madre adottiva.

Tra Monica e David si stabilisce dunque un vero e proprio legame affettivo. Un giorno, però, la medicina trova la cura per la malattia di Martin che guarisce e fa ritorno in famiglia. David capisce che il rapporto fra Monica e Martin è speciale e comincia a pensare che se anche lui diventasse un bambino vero potrebbe avere lo stesso amore che Monica nutre per Martin. Una serie di equivoci e di malfunzionamenti costringono Henry e Monica a disfarsi di David. David comincia così la sua ricerca di qualcuno

che lo possa trasformare in un bambino vero, comincia cioè la sua ricerca della Fata Turchina. Ne trova una statua in un parco giochi sommerso dal mare e, credendola vera, resta in attesa che lo trasformi in bambino. Passano duemila anni, una glaciazione ha distrutto la civiltà, David è entrato in stato di sospensione, l'umanità si è estinta e al suo posto è subentrata una razza di robot costruiti da generazioni di altri robot. I robot ritrovano David e lo «riportano in vita». David riesce ad ottenere da loro un clone di Monica che però può vivere solo un giorno. Il film si chiude sull'immagine di David che tiene la mano a Monica mentre si addormenta per sempre.

Blade Runner di R. Scott (1982) è ispirato al romanzo di P. K. Dick *Gli androidi sognano pecore elettriche?* (1968). Il film, e il romanzo, raccontano la storia di androidi (i replicanti, fabbricati con materiali biologici di origine sintetica) esteriormente indistinguibili dagli esseri umani. Poiché alcuni di questi androidi si comportano da criminali sono state istituite delle unità di polizia (dette *Blade Runner* appunto) per individuarli ed eliminarli. Per riconoscere un replicante da un essere umano la polizia sottopone i sospetti a un test, il test Voitkampf. Si tratta di una sorta di macchina della verità che permette di analizzare nei dettagli le reazioni fisiche dei sospetti a opportune domande. Evidentemente le reazioni dei replicanti risulteranno più «fredde» di quelle degli esseri umani.

All'origine di molti capolavori, il genio di Stanley Kubrik si è cimentato anche con il genere fantascientifico. Il celeberrimo *2001 Odissea nello spazio* (1968) è tratto da un racconto di Arthur C. Clarke, *La sentinella*, 1953[7]. Il protagonista del film di Kubrik, il calcolatore Hal 9000, è di aspetto completamente diverso da quello di David e dei replicanti. Fosse per il suo aspetto, Hal non ingannerebbe nessuno: non un ha corpo simile a quello di un essere umano, è semplicemente un calcolatore di grandi dimensioni con i suoi bravi pulsanti e spie luminose bene in evidenza. L'interfaccia fra uomo e calcolatore è l'obiettivo di una sorta di telecamera, una lente, l'«occhio» attraverso il quale Hal guarda l'ambiente in cui si trova che è un'astronave in viaggio verso Giove. Eppure Hal riesce non solo a svolgere compiti logico-matematici, come ogni bravo calcolatore, mantenendo per esempio in rotta l'astronave ma sembra provare anche emozioni, come l'orgoglio e la paura. L'orgoglio della perfezione delle sue prestazioni viene infatti un giorno ferito da una previsione sbagliata circa l'avaria del componente di un'antenna dell'astronave. Preoccupati dalla possibilità che Hal possa commettere errori più gravi gli astronauti decidono di disattivarlo. All'orgoglio subentra in Hal la paura e per impedire di essere disattivato uccide gli astronauti. Tutti tranne uno, David (lo stesso nome del protagonista di *AI*) il quale disattiva Hal e continua la missione.

4. Quali esseri hanno una mente?

Negli anni Cinquanta del Novecento il matematico Alan Turing – uno dei fondatori della moderna IA – si propose di affrontare in modo nuovo la questione che dà il titolo al paragrafo e scriveva:

> Mi propongo di considerare la domanda: «possono pensare le macchine?» [...]

> La nuova forma del problema può essere descritta nei termini di un gioco, che chiameremo il «gioco dell'imitazione». Questo viene giocato da tre persone, un uomo (A), una donna (B) e l'interrogante (C), che può essere dell'uno o dell'altro sesso. L'interrogante viene chiuso in una stanza, separato dagli altri due. Scopo del gioco per l'interrogante è quello di determinare quale delle altre due persone sia l'uomo e quale la donna. Egli le conosce con le etichette X e Y, e alla fine del gioco darà la soluzione «X è A e Y è B» o la soluzione « X è B e Y è A». L'interrogante può far domande di questo tipo ad A e B: «vuol dirmi X, per favore, la lunghezza dei propri capelli?» Ora supponiamo che X sia in effetti A, quindi A deve rispondere. Scopo di A nel gioco è quello di ingannare C e far sì che fornisca una identificazione errata [...] Le risposte, in modo che il tono della voce non possa aiutare l'interrogante, dovrebbero essere scritte, o, meglio ancora, battute a macchina. [...]
>
> Poniamo ora la domanda: «che cosa accadrà se una macchina prenderà il posto di A nel gioco?» L'interrogante darà una risposta errata altrettanto spesso di quando il gioco viene giocato tra un uomo e una donna? Queste domande sostituiscono quella originale: «possono pensare le macchine?». Il metodo delle domande e risposte sembra essere adatto per introdurre nell'esame quasi ogni campo della conoscenza umana che desideriamo. Non desideriamo penalizzare la macchina per la sua incapacità di brillare in un concorso di bellezza, né penalizzare un uomo perché perde una corsa contro un aeroplano. Le condizioni del nostro gioco rendono irrilevanti queste incapacità [19, p. 116]

I replicanti di *Blade Runner* sospetti di attività criminali vengono sottoposti ad un test simile a quello di Turing al quale, anzi, il test di Voitkampf è ispirato e del quale rappresenta la versione letteraria e cinematografica. Il test suppone che un essere che si comporti (dove il «comportamento» comprende anche le risposte verbali alle domande) in modo indistinguibile da un essere umano *sia* un essere umano[8]. Sicuramente tale supposizione è condivisa dai poliziotti dell'unità *Blade Runner* i quali non dubitano della validità del test. Diversa la posizione degli scienziati che hanno progettato Hal 9000. Uno di costoro, intervistato da un giornalista il quale chiede se Hal abbia emozioni, afferma che «si comporta come se le avesse, ma se le abbia davvero o no nessuno può dirlo con certezza». Nella prima scena di *AI* il professor Hobby espone ai collaboratori il progetto di costruire robot che provino emozioni e, per sottolinearne la novità, rivolge a un robot di vecchia generazione, identico nell'aspetto e nei comportamenti ad un essere umano ma incapace di provare emozioni, la domanda «Cos'è l'amore?» ottenendo la risposta: «l'amore è sgranare leggermente gli occhi, accelerare la respirazione, scaldare la pelle…».

In effetti superare il test non costituisce una prova decisiva del possedere pensieri ed emozioni poiché il test valuta comportamenti che potrebbero essere effettuati anche da una macchina priva di mente: tale macchina *simulerebbe* il provare, per esempio, dolore perché farebbe e direbbe tutto ciò che un essere umano fa e dice quando prova dolore senza tuttavia provare realmente dolore. Ciò che sfugge al test è proprio ciò che per gli esseri umani conta: l'avere pensieri e sensazioni, l'avere una vita interiore che,

insomma, equivale all'avere una vita *tout court*. L'amore non è solo «sgranare leggermente gli occhi, accelerare la respirazione, scaldare la pelle» ma provare un sentimento. In generale avere stati mentali – e, d'ora in poi, intendo per stati mentali tutto ciò che avviene nella nostra mente: pensieri, ricordi, sensazioni, sentimenti, consapevolezza ecc. – non è riducibile ai comportamenti che sono ad essi associati. Qualcuno, o qualcosa, potrebbe comportarsi come se pensasse o amasse ma in realtà non avere affatto una vita mentale. Questa, riteniamo, sia la situazione di una macchina (robot o calcolatore) o di uno zombi. È dunque sempre possibile dire dei robot, dei computer e magari degli alieni che simulano il comportamento umano: diciamo che essi si comportano *come se* avessero una mente, ma in realtà non ce l'hanno. Ma perché non diciamo lo stesso anche degli esseri umani? Forse perché sappiamo che nel loro cranio c'è qualcosa di speciale, responsabile della vita mentale: il cervello?

Se si considera il possesso di un sistema nervoso un elemento indispensabile per il possesso di una mente è naturale rivolgersi alle neuroscienze nella speranza di ottenere lumi per capire come «l'acqua del cervello si cambi nel vino della mente» [12, p. 173]. È questa la speranza di sui si è nutrito e si nutre quella forma di materialismo contemporaneo che va sotto il nome di teoria dell'identità[9]. Si tratta di una teoria nata alla fine degli anni Cinquanta del secolo scorso la quale sostiene che gli stati mentali sono identici a stati cerebrali. Questa forma di materialismo si differenzia da quella classica – rappresentata nella filosofia moderna per esempio da Hobbes – perché non sostiene una sua propria ontologia ma, piuttosto, affida alla ricerca delle scienze naturali il compito di pronunciarsi su quali siano i componenti ultimi della realtà. L'identità fra stati mentali e stati cerebrali è ritenuta una ipotesi la verifica o la falsificazione della quale deve essere affidata alla ricerca empirica, in particolare alle neuroscienze. Quasi tutto il lavoro teorico dei sostenitori dell'identità è stato infatti indirizzato a difendere la loro posizione da obiezioni a priori. Si tratta di obiezioni riconducibili, più o meno direttamente, alla cosiddetta legge di Leibniz secondo la quale se due entità sono identiche allora avranno le stesse proprietà. Descartes, per esempio, sosteneva che la mente è distinta e diversa dal corpo perché mente e corpo hanno proprietà diverse. I corpi, per esempio, sono estesi ma le menti no; la mente è invece in grado di pensare mentre il corpo no. I teorici dell'identità hanno cercato di mostrare che tali argomentazioni sono, in realtà, riconducibili a petizioni di principio: si assume la verità di ciò che deve essere dimostrato. Se si assume già che la mente non sia estesa e che la materia non possa pensare, è banale poi concludere che la mente e la materia sono distinte.

La sensibilità mostrata dalla teoria dell'identità per i risultati della ricerca scientifica potrebbe indurci a pensare che la teoria abbia riscosso un ampio consenso: ma ciò che è avvenuto è esattamente il contrario. I sostenitori della teoria sono rimasti un manipolo esposto al fuoco incrociato proveniente da più parti. L'esame di alcune di tali obiezioni ci permetterà di entrare un po' più in dettaglio nel problema mente corpo.

Nel film *Viaggio allucinante* [10], si immagina che sia possibile ridurre a dimensioni

microscopiche una sorta di sottomarino e di introdurlo, mediante iniezione endovenosa, nel circolo sanguigno di un essere umano. L'equipaggio del sottomarino, giunto al cervello, osserva ciò che ha osservato in ogni altra parte del corpo: tessuti, liquidi organici e cellule di ogni tipo. Ora, mentre l'osservazione di tali oggetti è ciò che è desiderabile osservare per spiegare come funziona, per esempio, il sistema immunitario o il cuore, non è di nessun aiuto per tentare di spiegare l'origine degli stati mentali dal cervello. Per quanto si osservi da vicino il cervello non si osserverà nessun pensiero. Ciò significa che i pensieri non hanno a che fare con il cervello? Nei secoli XVII e XVIII Descartes e Leibniz avevano risposto affermativamente a tale domanda. Leibniz, in particolare, aveva proprio immaginato una sorta di *Viaggio allucinante.* «Immaginiamo - scrive Leibniz nella *Monadologia* del 1714 - una macchina in grado di pensare, sentire, percepire; ed immaginiamo che sia così grande da poterci entrare a visitarla, come in un mulino. Visitandone l'interno non si troveranno altro che pezzi di materia che si spingono a vicenda, ma non si troverà nulla che possa spiegare la percezione»[11]. Una replica abbastanza ovvia, che difatti è stata avanzata, consisterebbe nel far notare che neppure la liquidità dell'acqua sarebbe percepibile se navigassimo sott'acqua con un sottomarino più piccolo delle molecole di idrogeno e di ossigeno: eppure l'acqua è liquida. Ma si potrebbe anche far notare che il pensiero non è qualcosa che si *osserva* in nessun senso ordinario del verbo *osservare*. Ora il problema è: questa considerazione vale pro o contro il materialismo? Dipende – e su questo il dibattito è in corso –. Se la «non-osservabilità-ordinaria» è una proprietà oggettiva del mentale allora, considerata anche l'«osservabilità-ordinaria» una proprietà oggettiva dei corpi, si può ricorrere alla legge di Leibniz per sostenere il dualismo. Se invece consideriamo le due modalità dell'osservabilità due diverse modalità di conoscere una stessa cosa, allora non se ne può ricavare la diversità fra stati mentali e stati del sistema nervoso più di quanto si possa ricavare la diversità fra Kubrik e il regista di *2001 Odissea nello spazio* perché io l'ho conosciuto personalmente e voi solo attraverso i suoi film.

Il possedere un cervello sembra essere così importante che siamo disposti a dire che un essere umano ha una mente anche se si comporta in modo abnorme: caso limite, non abbiamo tanta difficoltà ad attribuire una mente a malati completamente paralizzati affetti da distrofia amiotrofica laterale quanta ne abbiamo ad attribuirla ad un computer. Il problema etico dell'eutanasia, anzi, nasce perché sospettiamo che gli esseri umani possano continuare ad avere una mente anche in quei casi estremi in cui non la manifestano più. Siamo così passati dal considerare il comportamento e l'aspetto esteriore di un essere come indizi (non è il caso di usare la più impegnativa parola «prova») del possesso di una mente all'esame della sua costituzione interna.

Chiamati a decidere se un essere possiede o no una mente sembra dunque che utilizziamo un criterio di somiglianza e che ragioniamo così: «io ho una mente, quegli esseri somigliano a me, dunque quegli esseri hanno una mente». Ma in che senso intendiamo «somigliano», nell'aspetto esteriore e nel comportamento o nella costituzione interna? Il criterio della somiglianza che impieghiamo spontaneamente

per decidere se un essere ha una mente sembra infatti avere due componenti: un essere può essere simile a un altro nei comportamenti (reazione agli stimoli, discorsi, abilità, capacità di agire ecc.) e nella costituzione interna (materiale, organi, apparati ecc.). Evidentemente tutti gli esseri umani soddisfano entrambe le componenti, ma che dire di robot e alieni? Se ci pensiamo bene, tuttavia, il problema si pone già per esseri che non sono prodotti della fantasia. Anche per organismi che hanno una costituzione interna simile alla nostra, e ciò in sostanza significa che possiedono un sistema nervoso, non è così semplice stabilire se hanno o no stati mentali. Dov'è, nel regno animale, che cade la demarcazione fra organismi che possiedono stati mentali e organismi che non li possiedono? Se tutti hanno sistemi nervosi allora la demarcazione ha a che vedere con la complessità di quei sistemi?

Se cominciamo a considerare la questione anche da un punto di vista biologico, i problemi si moltiplicano: la domanda non è più solo «come può la coscienza sorgere da una molliccia materia grigia» ma anche «a cosa serve la coscienza?» Infatti la maggior parte degli esseri viventi non la possiede: milioni (letteralmente *milioni*: solo le specie attualmente note di insetti superano il milione[12]) di specie animali vivono benissimo senza e non sembrano avere nessuna intenzione di soccombere alle specie che la possiedono (ma poi, quante oltre alla specie umana?). Dov'è dunque il vantaggio biologico, selettivo, evolutivo dell'avere la coscienza? La questione non è banale poiché ci sono state e ci sono posizioni (dette epifenomeniste) che negano che la coscienza abbia una funzione anche per gli organismi che ne sono dotati. Secondo tale posizione la coscienza è un modo con cui veniamo a sapere che cosa accade nella nostra mente/cervello, ma non ha nessuna efficacia causale sui nostri comportamenti. Sarebbe come il guardare in uno schermo per computer: tramite esso vediamo ciò che succede nel computer ma non possiamo influenzarlo (quando lo facciamo, usiamo la tastiera). Si è sostenuto che l'inefficacia causale della coscienza non è in contrasto con la teoria dell'evoluzione: la situazione sarebbe analoga a quella della pelliccia degli orsi polari. La pelliccia degli orsi polari è calda e svolge egregiamente la sua funzione di proteggere l'animale dal freddo, tuttavia è anche pesante e ingombrante: ma se volete una pelliccia calda e confortevole dovete anche tenervi una pelliccia pesante e ingombrante. Penso però che si debba riflettere sul fatto che gli esseri umani privi di coscienza, per ragioni patologiche come per esempio il coma, non riescono a fare ciò che fanno gli esseri umani normali. Questo renderebbe insostenibile qualunque confronto fra esseri umani e animali privi di coscienza poiché negli organismi che ce l'hanno essa avrebbe efficacia causale.[13]

La presenza di un sistema nervoso in un organismo potrebbe accompagnarsi a comportamenti così diversi dai nostri che potremmo essere in imbarazzo nell'attribuzione di stati mentali a quell'organismo. Un filastrocca per bambini recita:

C'era una volta un ranocchio di stagno,
giù nell'acqua scura scura
tutta notte stava a bagno;

quando usciva all'aria pura
d'ogni cosa aveva paura

Evidentemente l'aver paura è uno stato mentale e quindi il ranocchio della filastrocca ha una mente (foss'anche di un solo stato): ma quanto diverso il suo comportamento dal nostro nel preferire l'acqua scura e fredda alla luce e all'aria pura! E quanto opposte alle nostre le sue opinioni in merito ai posti salubri! Sappiamo però dall'anatomia che il ranocchio possiede un sistema nervoso centrale, e questo ci trattiene dal negargli decisamente il possesso di stati mentali (non importa quanto semplici): infatti non neghiamo che abbia stati mentali ma diciamo che ha stati mentali diversi dai nostri. In generale attribuiamo stati mentali agli animali più per il fatto che sappiamo che possiedono un sistema nervoso che per le somiglianze esteriori o del comportamento. E ciò sembra corretto perché non possiamo pretendere, peccando di antropocentrismo, che solo esseri del tutto identici a noi abbiano stati mentali. Il che equivarrebbe poi a dire che in tutto l'universo solo noi umani abbiamo una mente.

L'avere una mente non è una proprietà isolabile da altre proprietà dell'organismo e dell'ambiente in cui vive. Per limitarsi al solo il caso della percezione esistono animali che impiegano modalità percettive del tutto sconosciute alla specie umana. Per esempio, alcuni serpenti delle famiglie Boidi e Crotalidi sono dotati di termorecettori che consentono loro di individuare a distanza la possibile preda dal calore del corpo. Essi avranno, dunque, una sorta di «rappresentazione termica del mondo» del tutto inimmaginabile a noi che ne abbiamo una rappresentazione prevalentemente «visiva». Ma, come è facile aspettarsi, il caso più famoso, e anche più citato anche nella letteratura filosofica sulla mente, è quello del sistema sonar dei pipistrelli. I dati forniti dalle ricerche in quest'ambito rendono difficile sostenere che gli stati mentali degli animali siano simili ai nostri. La considerazione è rilevante se si pensa che non tutte le teorie della mente considerano il sistema nervoso, e in generale la prospettiva biologica, elemento caratteristico per il sorgere del mentale. Queste teorie, dette funzionaliste, ritengono che la mente sia una sorta di programma per computer e che quindi l'hardware – il sistema nervoso - su cui il programma gira sia del tutto secondario.

5. Pensare e calcolare

Gli stati mentali ai quali ci siamo fin qui riferiti hanno una caratteristica in comune, quella di avere una qualità. Vedere un colore, avere paura, sentire freddo, provare un dolore, amare ecc. fanno tutti un certo effetto a chi li possiede. Ma vi sono stati mentali che non si distinguono per avere una particolare qualità: per esempio il cercare di risolvere un'equazione di secondo grado non fa nessun effetto. Almeno non in modo costitutivo. Può, sì, essere associato a stati qualitativi: posso per esempio provare soddisfazione nel pervenire alla soluzione, o ansia nel dover consegnare il compito non risolto, ma si tratta di sensazioni associate al calcolare: il calcolare come tale non fa nessun effetto. Eppure, e questo è ciò che ci interessa, calcolare è sicuramente uno stato mentale, è una forma di pensiero. Anzi è una delle forme più alte di pensiero. Eminenti

filosofi hanno considerato il calcolare come il modello stesso del pensare. È superfluo dire che senza quest'idea (nata con Hobbes e Leibniz in età moderna e sviluppata nel corso XX secolo con strumenti logico matematici più raffinati) non avremmo i computer. Infatti i computer – lo dice il nome – computano, contano, calcolano. Ma se calcolare è una forma pensiero allora ne dovrebbe seguire che i computer pensano. Questo è il ragionamento che sta dietro alle storie di fantascienza che hanno per protagoniste computer e robot. Forse Hal 9000 pensa; ma se «lui» pensa perché calcola allora pensava anche la calcolatrice di Pascal, una macchinetta a manovella composta da ingranaggi che assomigliava più a un macinino per caffé che a un computer?

C'è una teoria contemporanea della mente che fa dell'idea che pensare sia calcolare la sua forza: è il funzionalismo o teoria computazionale[14] della mente cui ho accennato sopra. Per il funzionalismo gli stati mentali non sono stati del sistema nervoso, ma stati funzionali. Uno stato funzionale è uno stato che può essere individuato grazie alle sue relazioni con altri stati dell'organismo, cioè con i dati sensoriali che lo causano (input), con i comportamenti che, a sua volta, esso causa (output) e con altri stati mentali (credenze, opinioni, ricordi eccetera). La rete di sensazioni, comportamenti e stati mentali che definiscono un certo stato mentale è caratteristica di tale stato. Se, per esempio Giovanni si trova nello stato «avere mal di denti» allora Giovanni si trova in uno stato tale che 1. è causato da: avere mangiato troppi dolci e avere una carie; 2. è causa di: lamenti, premersi una mano sulla guancia, prendere un analgesico, telefonare al dentista; 3. è associato a: credere che un analgesico calmerà il dolore, credere che il dentista abbia una laurea in medicina ecc. In generale uno stato mentale x è definito in funzione di altri elementi v, w, y, z per cui $x= f (v, w, y, z)$.

Considerati come stati funzionali gli stati mentali possono essere concepiti come programmi per computer, dal momento che gli stati funzionali sono concepibili come programmi per computer. Definiamo, semplicemente, un programma per computer come una lista di istruzioni tale che, a partire da certi input e certi stati interni produce certi output[15]. Ora, quello che è decisivo per la filosofia della mente, è il fatto che i programmi sono nozioni astratte realizzabili fisicamente in molti modi diversi. Il materiale di cui è costituito un computer è indifferente: quello che conta è il programma che può essere implementato in supporti materiali diversi. Per il funzionalismo la mente sta al software come il cervello sta all'hardware: uno stesso software può essere realizzato in macchine materialmente diverse. Il cervello umano è solo uno dei possibili supporti materiali in cui può essere implementato un programma che descrive i nostri stati mentali. Se è così, allora, gli stati mentali non sono stati del sistema nervoso più di quanto non possano essere stati di un sistema elettronico, idraulico, meccanico…[16] Questa tesi, caratteristica del funzionalismo, è nota come tesi della realizzazione molteplice degli stati mentali. Si capisce dunque perché il funzionalista sia più disposto di altri ad assegnare stati mentali a robot, a computer e ad alieni. Solo adottando tale tesi è possibile attribuire stati mentali a esseri fisicamente diversi da noi (animali, alieni, artefatti).

Il principale problema del funzionalismo nasce dal fatto che la descrizione del mal di denti di Giovanni (per riprendere l'esempio sopra riportato) sarebbe corretta anche nel caso in cui Giovanni fingesse di avere mal di denti oppure soffrisse, stoicamente, senza manifestarlo. Quello che sfugge alla descrizione funzionale è la «dolorosità» del mal di denti, cioè il fatto che il mal di denti «faccia male». Questo aspetto, qualitativo, è invece proprio ciò che conta nello stato mentale di Giovanni: l'avere un mal di denti è esattamente il *sentire* un dolore. In generale gli stati qualitativi (*qualia*) costituiscono l'ostacolo più serio in cui il funzionalismo si è imbattuto. Gli esperimenti mentali elaborati intorno a questo problema sono numerosi, ne ricorderò tre proprio perché sono buoni esempi di esperimenti mentali

Siano A e B due organismi che percepiscono lo spettro dei colori invertito: ad A i pomodori maturi e gli automezzi dei pompieri appaiono dello stesso colore in cui a B appare il colore dell'erba e delle foglie. D'altra parte ad A il colore dell'erba appare dello stesso colore in cui a B appaiono gli automezzi dei pompieri. Come potremmo accertare che A vede «verdi» i camion dei pompieri? Interrogato risponderà che il colore di tali oggetti è «rosso» poiché gli è stato insegnato che il nome del colore degli automezzi dei pompieri è «rosso», nonostante il fatto che gli appaiano verdi. Insomma A e B avranno le stesse credenze e si comporteranno nello stesso modo di fronte a oggetti che vedono di colori diversi. Dunque le descrizioni funzionali di A e B saranno identiche nonostante il fatto che A e B abbiano stati qualitativamente diversi. La descrizione funzionale non riesce pertanto a cogliere l'aspetto più importante della visione: la qualità del colore percepito.

Nel secondo esperimento mentale si tenta di mostrare come la descrizione funzionale di un organismo che abbia un certo stato qualitativo sia identica a quella di un organismo analogo che però manchi di tale stato. Ad esempio N. Block immagina che tutta la popolazione della Cina sia impegnata a realizzare un programma che descrive uno stato mentale di un essere umano, diciamo il mal di denti di Giovanni. Ogni cinese realizzerà un passo di tale programma e quindi la descrizione funzionale della Cina sarà identica a quella di Giovanni quando ha il mal di denti. Ma la Cina non proverà un mal di denti. Anche in questo caso, dunque, la descrizione funzionale fallisce nel cogliere l'aspetto caratteristico di quello stato mentale: la qualità del dolore.

Come ho detto, argomenti simili a quelli precedenti sono, nella letteratura specifica, numerosi (una versione del primo è d'altronde già reperibile in Locke). Ma la critica più diffusa contro il funzionalismo e, in genere, contro ogni teoria computazionale della mente, è quella avanzata da J. Searle. Egli ha rovesciato il test di Turing cercando di mostrare che i computer non possono pensare e che, siccome gli esseri umani pensano, le teorie computazionali sono false in quanto considerano la mente umana come un computer. Allo scopo di decidere se una macchina abbia stati mentali non è necessario né sufficiente osservare i comportamenti della macchina o analizzarne gli stati interni: più semplicemente esaminiamo ciò che avviene negli esseri umani quando questi si comportano come una macchina. In altre parole per sapere se i computer pensano

dobbiamo metterci nei panni del computer. È questo l'argomento della stanza cinese e suona come segue:

> Supponiamo che io sia chiuso dentro una stanza e che mi si dia una serie di fogli scritti in cinese. Supponiamo inoltre (come infatti è il caso mio) che non conosca il cinese, né scritto né parlato e che, anzi, non sia nemmeno in grado di poter riconoscere uno scritto cinese in quanto tale, distinguendolo magari dal giapponese o da scarabocchi senza senso. Per me la scrittura cinese è proprio come tanti scarabocchi senza senso. Ora supponiamo ancora che mi sia dia un secondo pacco di fogli, sempre scritto in cinese, unitamente ad una serie di regole per mettere in relazione il secondo plico con il primo. Le regole sono nella mia lingua e io capisco queste regole come qualunque altro parlante la mia stessa lingua. Esse mi rendono possibile mettere in relazione una serie di simboli con una serie di altri simboli esclusivamente in virtù della loro forma. Ora supponiamo che mi si dia una terza serie di simboli cinesi con le relative istruzioni, sempre nella mia lingua, che mi rendano possibile correlare elementi di questo terzo pacco con i primi due, e che queste regole mi istruiscano su come riprodurre certi simboli cinesi con certi tipi di forme datemi nel terzo plico. A mia insaputa, le persone che mi danno tutti questi simboli chiamano il primo pacco di fogli «uno scritto», chiamano il secondo «una storia» e il terzo «quesiti». Inoltre chiamano i simboli che rendo loro in risposta al terzo plico «risposte ai quesiti», e la serie di regole nella mia lingua che mi hanno dato la chiamano «il programma». [...] Supponiamo anche che io diventi così bravo nel seguire le istruzioni per manipolare simboli cinesi e che i programmatori diventino così bravi nello scrivere i programmi che dal punto di vista esterno – cioè dal punto di vista di qualcuno al di fuori della stanza nella quale sono chiuso – le mie risposte alle domande assolutamente non si distinguano da quelle di cinesi madrelingua. Nessuno che guardi bene alle mie risposte può dire che io non parli una parola di cinese [...] ma produco le risposte con il manipolare simboli formali non interpretati. Per quanto riguarda il cinese, mi comporto semplicemente come un computer: eseguo operazioni calcolabili su elementi formalmente specificati. Per il caso del cinese, io sono semplicemente una istanziazione di un programma per computer. [18, pp.48-49]

Il punto essenziale della posizione di Searle è che se, come il suo argomento vorrebbe dimostrare[17], la mente non può derivare dal software allora deve derivare dall'hardware, cioè da qualche proprietà fisico chimica del cervello.

In parte per i suoi problemi interni, in parte per il progresso delle ricerche sull'intelligenza artificiale, il funzionalismo ha cominciato a lasciare spazio a un'altra prospettiva che costituisce a tutt'oggi una ricerca in corso: il connessionismo o teoria delle reti neurali. Si tratta ancora di una teoria computazionale ma temperata da una tesi tipicamente materialistica, quella, cioè, di prendere in considerazione i risultati delle ricerche delle neuroscienze. Anche il connessionismo ritiene, infatti, con il funzionalismo, che gli stati mentali siano stati di un programma, ma, con la teoria dell'identità, tiene presenti le caratteristiche fisico-biologiche del cervello umano. Ad esempio il fatto che il cervello umano è, rispetto ai computer, lento nell'elaborare le

informazioni, oppure il fatto che il cervello è eccellente nel riconoscere le forme ma, rispetto a un computer, ha scarse abilità di calcolo. Ma la caratteristica più saliente delle reti neurali risiede nella loro capacità di apprendere: come il cervello, esse non hanno bisogno di essere preventivamente programmate. Se questa nuova prospettiva si affermerà definitivamente allora la contrapposizione fra sostenitori e denigratori dell'idea che la mente è un computer potrà essere superata: la risposta non sarà né sì né no, ma un po' sì e un po' no.

5. Zombi

In quanto abbiamo veduto sopra si è fatto largo uso della fantasia, degli esperimenti mentali e della fantascienza. Spero che sia risultata evidente l'utilità di tali procedure, le quali sovente ci permettono di chiarire i problemi scorgendone aspetti nascosti. In questo senso esse hanno un autentico valore euristico. Tuttavia vorrei – saggiamente – riequilibrare le cose e concludere con l'avvertenza che la fantasia può portarci anche là dove non dovremmo andare, se vogliamo appunto fare scienza e non solo fantascienza. Per far questo mi servirò degli zombi. D'altra parte, non è possibile intervenire su cinema e fantascienza senza menzionare gli zombi.

Anche in questo caso siamo abbiamo a che fare con un esperimento mentale che intende mostrare che gli stati mentali non sono stati cerebrali. Gli zombi della filosofia non assomigliano a quelli della fantascienza o dei film dell'orrore: nei film è infatti facile capire se qualcuno è uno zombi: si muove in modo impacciato, ha un colorito verdastro e perde i pezzi. Gli zombi della filosofia sono completamente indistinguibili dagli esseri umani, non solo come aspetto e come comportamento, ma se ne fate l'autopsia trovate che all'interno sono identici a noi. L'unica differenza sta nel fatto che sono privi di stati mentali e di coscienza. In casa non c'è nessuno. Ora l'argomento è: se sono concepibili gli zombi come appena descritti, cioè esseri fisicamente identici a noi ma privi di coscienza, allora la coscienza non è implicata da nessun fatto fisico. Scrive l'autore di tale argomento:

> Consideriamo il mio gemello zombi. Questa creatura è identica a me molecola per molecola e per tutte le proprietà di basso livello postulate da una fisica completa, ma lui è totalmente privo di esperienza conscia […] Egli è identico a me fisicamente, e possiamo anche supporre che sia immerso in un ambiente identico. Certamente è identico a me funzionalmente […] e dà luogo agli stessi comportamenti indistinguibili. È psicologicamente identico a me […] è vigile, capace di riferire il contenuto dei propri stati interni, capace di concentrare l'attenzione sui vari luoghi e così via. Semplicemente nessuno di questi processi è accompagnato da una qualsivoglia esperienza conscia autentica. Non c'è un sentire in senso fenomenico. Non si prova nulla a essere uno zombi [3, p. 97].

Sicuramente un tale essere è *immaginabile* e ciò, continua Chalmers, è sufficiente per costruire un argomento antiriduzionista:

1. se gli zombie sono immaginabili,

2. allora sono possibili;
3. se sono possibili
4. allora possono esistere;
5. se possono esistere allora il fisicalismo è falso.

Anche la discussione su tale argomento è accesa e ha prodotto molta letteratura nella filosofia della mente contemporanea, ma l'impressione è che tale dibattito sia divenuto autoreferenziale. Da un punto di vista meramente logico tutti i contendenti possono reperire argomenti per continuare a sostenere le loro posizioni. Concetti come quelli di possibilità e necessità metafisica, logica e reale sono complessi e intrattengono relazioni complicate sulle quali non c'è unanimità. Non è ancora sufficientemente chiaro quali siano i confini e i rapporti fra ciò che è immaginabile, ciò che è concepibile, ciò che è logicamente possibile e ciò che è realmente possibile. C'è tuttavia, a mio avviso, un modo relativamente semplice di non smarrirsi nel *fog of war* sollevato dalla discussione ed è quello di riprendere l'ispirazione di fondo del fisicalismo, cioè di rifarsi ad un approccio naturalistico. Immaginiamo un'automobile-zombi: essa è esattamente come un'auto normale, atomo per atomo, e tuttavia – direbbe Chalmers - mentre l'auto normale si mette in moto l'auto-zombi non parte. Si possono immaginare due auto identiche atomo per atomo una delle quali non parta? Bhè, potremmo appunto scriverci sopra un racconto di fantascienza intitolato *Lo strano caso dell'auto-zombi* ma la conclusione non può essere che una: alla fine un meccanico-eroe scopre un guasto che nessun era riuscito a scoprire. Ora, cosa c'è di diverso fra il caso dell'auto-zombi e quello dell'uomo-zombi? A mio avviso niente, altrimenti non ho capito l'argomento. La plausibilità (apparente) dell'argomento degli zombi deriva da secoli di dualismo: viviamo in una cultura che da secoli crede che la mente sia diversa dal corpo e questo ci ha familiarizzato con l'idea che la mente e il corpo possano esistere separatamente. Insomma ci sono storie di zombi perché ci sono anche storie dei fantasmi: le storie delle auto-zombi suonano invece strane perché non ci sono storie di auto-fantasma (ma ce n'è una sulle navi: l'*Olandese volante*). Se domani si scoprisse che gli stati mentali sono stati fisici del cervello allora fra qualche secolo i filosofi non potrebbero più riuscire a concepire menti separate dai corpi, così come, dopo le scoperte di Faraday, non è più concepibile che i metalli non conducano elettricità. La morale? Eccola: spesso l'immaginazione precede la conoscenza, ma a volte è bene che la segua. E con ciò concludo[18].

Note

[*] In ciò che segue ho unito due tipologie di lezioni che ho tenuto nell'ambito di *Pianeta Galileo 2006*: una a Grosseto il 19 ottobre, dal titolo *Il problema mente-corpo*, l'altra a Cecina il 9 novembre e a Massa il 24 ottobre dal titolo *Matrix et alia: intelligenza artificiale e filosofia*. Propongo qui un unico testo poiché il contenuto di tutti gli incontri è stato sostanzialmente lo stesso; nelle manifestazioni di Cecina e di Massa al contenuto presentato a Grosseto sono stati aggiunti i riferimenti al cinema. Poiché nel più ci sta il meno la versione che segue è quella di Cecina e di Massa.

[1] Un'agile lettura sugli esperimenti mentali è [7]

[2] Sul rapporto fra cinema e filosofia cfr. [17], [2].

[3] Una macchina del genere è anche lo spunto del film *La mosca* di D. Cronenberg (1986) tratto da un racconto di G. Langelaan.

[4] Un'altra questione molto discussa nella filosofia ha a che fare con la seguente domanda: è possibile che 2+2 non faccia 4? Perché no? Questa domanda è dello stesso tipo di quest'altra: il rame potrebbe non condurre elettricità? E ancora: Se Napoleone non avesse perduto a Waterloo sarebbe sempre Napoleone? Un Napoleone vittorioso a Waterloo sarebbe un «Napoleone-vittorioso-a-Waterloo» o non sarebbe per niente Napoleone? Se non avessi partecipato al Pianeta Galileo – come relatore o come ascoltatore .- sarei sempre io? Questioni del genere, che hanno a che fare con la cosiddetta logica modale, sono presenti in numerosi film, anche non appartenenti al genere fantascientifico, come *La vita è meravigliosa*, *Ritorno al futuro* e *Sliding Doors*. Ma su di essi non dirò nulla poiché sono oggetto dell'intervento di Sani (cfr. *infra* pag. 355).

[5] Cfr. [14]

[6] B. W. Aldiss, *I Supertoys che durano tutta l'estate*, *I Supertoys quando arriva l'inverno* e *I Supertoys nella nuova stagione*, pubblicati negli USA tra la fine degli anni Sessanta e i primi anni Settanta del secolo scorso. Il primo è stato tradotto in italiano nel 1999 sul «Corriere della Sera» del 27 novembre 1999. Adesso si possono leggere tutti nella trad. it. in [1].

[7] Cfr. [4]. Il successo del film indusse Clarke a riscrivere il racconto in forma più ampia, cfr [5]

[8] Ma la posizione di Turing era più articolata, perfettamente consapevole dell'importanza dell'obiezione secondo la quale «il solo modo per cui si potrebbe esser sicuri che una macchina pensa è quello di *essere* la macchina e di sentire se stessi pensare» ma anche del fatto che questa strada porterebbe al solipsismo: «secondo questa opinione la sola via per sapere che *un uomo* pensa è quella di essere quell'uomo in particolare. […] Invece di discutere in continuazione su questo punto, è normale attenersi alla convenzione – suggerita dalla buona creanza – che ognuno pensi» [19] p. 169

[9] Cfr. [16]. Per un panorama introduttivo alle varie teorie della mente cfr. [15]

[10] *Viaggio allucinante* (1966) per la regia di R. Fleischer tratto da un racconto di O. Klement, si segnalò per gli effetti speciali e vinse due premi Oscar. I. Asimov trasse un racconto omonimo dalla sceneggiatura del film che uscì nello stesso anno e poi un *Viaggio allucinante II* intitolato *Destinazione cervello*.

[11] Ha scritto recentemente McGinn: «la proprietà della coscienza stessa (o di specifici stati consci) non è una proprietà osservabile o percepibile del cervello. Potete risiedere in un cervello conscio vivente, nel vostro o in quello di qualcun altro, e osservare una gran varietà di proprietà - forme, colori, strutture e così via - ma con ciò non vedrete quello che il soggetto sta sperimentando, cioè lo stesso stato conscio. Gli stati consci non sono semplicemente, in quanto stati consci, potenziali oggetti di percezione: essi dipendono dal cervello ma non possono essere osservati dal dirigere i sensi sul cervello. Non è possibile vedere uno stato cerebrale in quanto stato conscio». [12, p. 183. Traduzione modificata]

[12] Non ho prove che gli insetti non abbiano una coscienza ma credo che tutti lo pensino: se ci fosse qualcuno che pensa il contrario possibile che non abbia mai protestato per il genocidio che noi umani perpetriamo tutte le estati a danno delle zanzare? L'attribuire una mente a un essere ha anche inevitabili implicazioni etiche e giuridiche. In uno dei suoi interventi filosofico-fantascientifici H. Putnam si chiede se i robot debbano godere dei diritti civili. Anche a questo riguardo si potrebbero citare numerosi film fra i quali lo stesso *AI* in cui David si trova al centro di un dilemma morale quando i genitori decidono di disfarsene. Un robot che rivendica e ottiene diritti civili è Andrew, protagonista di *L'uomo bicentenario* di C. Columbus (1999) tratto da un racconto di I. Asimov del 1976.

[13] B. Libet ha condotto molti esperimenti che dimostrano come la presa di coscienza di un atto volontario segue di circa 250 ms i corrispondenti eventi cerebrali. Ciò significherebbe che noi non decidiamo nulla: è il nostro cervello che decide e noi (cioè la nostra coscienza) ne veniamo messi al corrente dopo. È una forma di epifenomenismo sostenuta da prove sperimentali. Tuttavia Libet riconosce alla coscienza un diritto di veto: essa può intervenire a bloccare una decisione già deliberata dal cervello. Si tratterebbe dunque di una forma di semi-epifenomenismo. Cfr. [11] e [8]. La metafora – ottocentesca - che paragona la coscienza al fumo di una locomotiva intende illustrare l'epifenomenismo: il fumo è causato dalla locomotiva ma non ha nessun effetto su di essa.

[14] In realtà esistono molte versioni diverse del funzionalismo e dunque molte teorie computazionali. Teoria computazionale – al singolare – è dunque il nome di una famiglia.

[15] Come si vede si tratta di una nozione perfettamente coerente con la descrizione che abbiamo dato del mal di denti.

[16] L'astronomo F. Hoyle ha immaginato nel racconto di fantascienza *La nuvola nera* una nebulosa nella quale la materia è organizzata in modo da produrre intelligenza. Cfr. [10]. Non so se sia stato tratto un film da quel racconto, so che è stato tratto uno sceneggiato televisivo da un altro racconto di Hoyle intitolato *La nebulosa di Andromeda*. Ma molti anni fa quando la televisione era in bianco e nero e (ci crederete?) occorreva alzarsi dalla poltrona per cambiare canale

[17] Naturalmente, come tutti gli altri, anche l'argomento della stanza cinese ha sollevato un vasto dibattito, ricordiamo qui soltanto la replica di Hofstadter il quale ha osservato che se è vero che la simulazione al calcolatore di un uragano non è un uragano, la simulazione di una dimostrazione matematica è una dimostrazione matematica [9, p. 99].

[18] Una confessione finale: non è vero che ho conosciuto personalmente Kubrik.

BIBLIOGRAFIA

[1] Aldiss B. W., *A.I. Intelligenza artificiale*, Mondadori, Milano 2001.
[2] Cabrera J., *Da Aristotele a Spielberg. Capire la filosofia attraverso i film*, Bruno Mondadori, Milano 2003.
[3] Chalmers D., *La mente cosciente,* McGraw-Hill, Milano 1999.
[4] Clarke A. C., *La sentinella* , (1953), in «Gamma», n. 14, gennaio 1967.
[5] Clarke A. C., *2001 Odissea nello spazio,* (1968), Longanesi, Milano 1972.
[6] Descartes R., *Discorso sul metodo*, Laterza, Bari 1978.
[7] Cohen M., *Lo scarabeo di Wittgenstein e altri classici esperimenti mentali*, Carocci, Roma 2006.
[8] Gazzaniga M., *La mente inventata*, Guerini, Milano 1999.
[9] Hofstadter D., Dennett D., *L'io della mente*, Adelphi, Milano 1985.
[10] Hoyle F., *La nuvola nera,* Garzanti, Milano 1966.
[11] Libet B., *Mind Time*, Cortina, Milano 2007.
[12] McGinn C., *Possiamo risolvere il problema mente-corpo?* in [16] pp. 173-196.
[13] Putnam H., *I robot: macchine o vita creata artificialmente?,* in *Mente, linguaggio e realtà*, Adelphi, Milano 1987, pp. 416-438.
[14] Putnam H., *Cervelli in una vasca,* in *Ragione verità e storia*, Il Saggiatore, Milano 1985, pp. 7-28.
[15] Salucci M., *Mente/Corpo*, La Nuova Italia, Firenze 1997.
[16] Salucci M. (a cura di), *La teoria dell'identità. Alle origini della filosofia della mente*, Le Monnier, Firenze 2005.
[17] Sani A., *Il cinema tra storia e filosofia*, Le Lettere, Firenze 2002.
[18] Searle J., *Menti, cervelli e programmi. Un dibattito sull'intelligenza artificiale,* CLUP-CLUED, Padova 1984.
[19] Turing A., *Macchine calcolatrici e intelligenza*, (1950), in Somenzi V. (a cura di), *La filosofia degli automi*, Torino, Boringhieri 1965, pp. 116-156.

Questioni di bioetica, scienza e antropologia filosofica

Stefano Miniati

Dipartimento di Studi Storico-Sociali e Filosofici, Università di Siena (Sede di Arezzo)

1. Posizione del problema

I problemi sollevati dagli sviluppi dell'indagine biomedica, che si costituiscono sempre più come questioni-limite – ovvero come questioni di confine che impongono alla ragione morale di forzare in maniera crescente la sfera d'applicazione delle proprie categorie tradizionali –, coinvolgono in misura sempre maggiore l'interesse di personale non sanitario, il quale è chiamato in varie misure a discutere sul valore e le prospettive di quell'indagine. Di là dal concreto fatto storico che ha visto la bioetica nascere, quasi quaranta anni fa, come «scienza della sopravvivenza» dell'intero sistema ecologico planetario[1], oggi il punto focale delle ricerche etiche nell'ambito delle scienze della vita è sicuramente l'uomo, oggetto e insieme soggetto di procedimenti terapeutici che sempre meno risultano inquadrabili nella prospettiva della «cura», e quindi inseribili immediatamente nel quadro teorico delimitato classicamente dai tre princìpi ippocratici della beneficienza, non maleficienza e giustizia, che costituivano le «linee guida» tradizionali del rapporto medico-paziente.

Questioni come quelle se sia o meno giusto, da un punto di vista etico e giuridico, parlare di eutanasia nei casi di gravi patologie incurabili, se sia o meno giusto progettare interventi di genetica migliorativa sugli embrioni o ancora se il principio dell'informazione completa data al paziente esiga anche la comunicazione di diagnosi sfavorevoli che possiedano solo un determinato grado di probabilità, non permettono di decidere in maniera immediata se si stia agendo a vantaggio del paziente o piuttosto a suo danno, non consentono di capire se si stia «facendo il suo bene» (beneficienza) o se piuttosto non stiamo «nuocendogli» (non maleficienza).

Ancora più complessa, se si vuol rimanere all'interno della deontologia ippocratica, appare la decisione in merito all'esecuzione di terapie «giuste». Dei tre princìpi ippocratici, quello riguardante la giustizia è stato spesso trascurato non solo all'interno della deontologia medica, ma anche dalla gran parte delle bioetiche, oppure è stato interpretato per lo più nel senso della giustizia sanitaria, ovvero della razionale equità nell'uso delle risorse sanitarie disponibili[2].

Non è certamente né opportuno né realistico trascurare il fattore economico nell'odierna situazione economica sanitaria, che si trova, nei paesi occidentali, a dover sempre più far fronte ad un'endemica scarsità di risorse e nondimeno ad un numero

crescente di persone da assistere; tuttavia la focalizzazione della giustizia unicamente sul fattore economico deve considerarsi il sintomo da un lato di un'etica che tende a risultare deontologicamente sempre più procedurale (fossilizzata cioè in protocolli istituzionalizzati privi di ogni «riguardo verso la persona») e moralmente sempre più individualista; dall'altro di una concezione del diritto che rifiuta qualsiasi fondazione *materiale* (ovvero radicata in un nucleo basilare di norme capaci di fondare l'agire positivo individuale e sociale) dello *ius gentium*; esso nei fatti si concreta o nella enunciazione di princìpi estremamente *formali* (come nel caso dei diritti universali dell'uomo, che subiscono, nelle applicazioni specifiche, interpretazioni del tutto discordanti) o si polverizza nei diritti positivi, che per loro natura non sono in grado di soddisfare le esigenze normative di una ricerca biomedica che avanza attualmente a ritmi vertiginosi.

La maggior parte delle bioetiche assume come nucleo centrale della propria indagine la vita dell'uomo, e assegna a questa vita un valore in base ad una scala graduata che dipende dai presupposti dai quali prende di volta in volta le mosse. Così si parla di etiche della sacralità della vita e di etiche della qualità della vita, di etiche della disponibilità e indisponibilità della vita. Questa centralità è dovuta ovviamente al fatto che non è altro che la vita ad essere strettamente connessa agli eventi della malattia e della morte, e quindi oggetto specifico delle cure e dell'attenzione medica. Tuttavia questa attenzione alla vita non corrisponde ad una pari chiarezza sul senso che le si deve assegnare.

Se è in buona parte vero, come ha notoriamente sostenuto Michel Foucault, che la vita *in senso biologico* (non, naturalmente, filosofico-antropologico) diviene oggetto autonomo di studio solo successivamente alla teorizzazione darwiniana – vita e lotta per la vita come sostrato di ogni possibile processo evolutivo – a un secolo e mezzo di distanza dalla pubblicazione de '*L'Origine delle specie*' non vi è accordo su cosa essa sia né dentro né fuori il mondo delle scienze biologiche[3]. Qui si può solo rilevare che le due tendenze oggi dominanti, quella della «geneticizzazione della vita»[4] e quella, correlata, di definire la vita organica semplicemente come un sottoinsieme della vita codificata, la quale comprende anche la vita artificiale, risulta insufficiente alla trattazione bioetica[5].

Di fatto, questa enfasi sul fenomeno «vita» – che come ho detto è nella maggior parte dei casi «vita umana» – pone spesso in secondo piano la questione che la fonda, ovvero quella intorno alla riflessione sull'uomo che è agente di tale vita – anche se tale riflessione poi è naturalmente sottesa ad ogni concezione bioetica. Ma questo «essere sottesa» significa, a mio parere, anche essere trascurata in quanto non resa esplicita nelle sue molteplici complessità[6].

Scopo della presente indagine è quello di sondare alcune antropologie che stanno alla base dei tipi principali di bioetica oggi presenti, e di analizzarle secondo alcuni criteri antropo-filosofici mutuati in particolare dall'antropologia filosofica moderna, che vede i suoi nomi più rappresentativi in Max Scheler, Arnold Gehlen e Helmut Plessner. La caratteristica comune dell'antropologia di questi autori (parziali eccezioni che tuttavia qui non possono essere approfondite, si devono avanzare nel caso di

Scheler) risiede nel fatto di situarsi su di un piano puramente filosofico, che in linea di principio rinuncia ad ogni approccio metafisico e cerca di servirsi in maniera razionale dei risultati dell'indagine empirica sull'uomo (antropologia fisica e culturale, psicologia, sociologia, etnologia).

La rinuncia all'approccio metafisico non significa una svalutazione del dato sovrasensibile e sovraempirico, ma significa unicamente la delineazione di una concezione dell'uomo che si basi almeno su un piano filosofico-empirico largamente condivisibile. In più, le dottrine dell'antropologia filosofica moderna, con la loro indole olistica[7], consentono di riportare ad unità i disparati e polverizzanti sguardi forniti dalle scienze umane[8], e in questo trovano un notevole punto di contatto con le ragioni della bioetica, che hanno posto di nuovo e prepotentemente sulla scena il problema «uomo» nella sua totalità di senso. L'approccio antropo-filosofico può così forse rappresentare un valido strumento teorico per chiarire alcune questioni bioeticamente controverse, non nel senso di semplificare nella teoria ciò che nella pratica risulta complesso, ma al contrario per illuminare la pratica morale di una complessità che spesso viene tralasciata[9].

In questa breve esposizione desidero evidenziare in quale senso l'approccio antropo-filosofico possa risultare utile alla bioetica. Tale analisi, condotta anche attraverso la veloce descrizione di un *case-study*, mi permetterà di evidenziare i nessi che una visione più globale e sfaccettata del composto umano possono intrecciare con l'indagine etica nell'ambito delle scienze della vita. L'evidenziazione di questi nessi servirà a introdurre la rilevanza della ripresa di un accostamento di concezioni bioetiche e antropologiche, come possibile base per la costituzione di una bioetica capace di superare le secche di una medicina puramente protocollare, il che è oggi da più parti richiesto in ambito sanitario.

2. Quale antropologia filosofica per la bioetica?

La scelta di adoperare come base interpretativa alcuni elementi dell'antropologia filosofica moderna – che qui è descritta solo in alcuni punti rilevanti per la presente indagine – si basa principalmente sulla tendenza olistica sua peculiare, di cui anche prima si diceva. Questa tendenza si realizza soprattutto nel considerare il lato fisico-biologico ed il lato psichico-spirituale dell'uomo come aspetti che in misura diversa ma con lo stesso valore costituiscono la complessa «essenza» dell'uomo. Indubbiamente ciò rappresenta un tratto caratteristico che non è dato ritrovare, ad esempio, nell'antropologia tedesca del XVIII secolo di Kant, Herder ed Hegel, in quella fenomenologico-esistenzialista di Heidegger, Jaspers o Marcel, né in quelle antropologie che, al contrario di queste, vogliono fondarsi del tutto in modo «obiettivo» sui risultati delle scienze empiriche quali la biologia, la psicologia, l'etnologia. Nelle prime l'elemento della corporeità, del dato fisico nell'uomo è dato per assodato e con ciò passato sotto silenzio[10]; nelle seconde assurge, nelle sue componenti psico-fisico-sociali, ad unico oggetto di ricerca[11]. Di un tale unilateralismo soffre precisamente anche la bioetica attuale.

Non è difficile comprendere come concezioni di questo tipo, per quanto

filosoficamente articolate e profonde, non riescano a risultare decisive per un'etica biologica che si concentra soprattutto sulle questioni del corpo dell'uomo, dei suoi stati patologici, ma anche della comprensione che il soggetto stesso ha di entrambi. Sono del parere che l'enfasi utilitaristica della cosiddetta «bioetica laica» proprio sui dati del tutto corporei di dolore e piacere fisici come misura decisiva del ragionamento etico, non rappresenti una valida alternativa alla tradizionale sovraordinazione della sfera spirituale dell'uomo rispetto a quella corporea, che gli esponenti della bioetica cattolica adottano di fronte elle esigenze della ricerca biomedica attuale. La prima impostazione si dimostra deficitaria nel momento in cui fa dell'etica una prassi decisionale che, in ultima analisi, si basa su un bilancio puramente algometrico, il quale suppone la completa misurabilità degli stati di dolore e di piacere. Anche il cosiddetto «benesserismo» (o utilitarismo qualificato), ovvero l'etica delle «preferenze», pretende di fondare la capacità individuale di decisione su un bilancio di questo tipo, e in definitiva si affida in maniera quasi totale alla capacità diagnostica e previsionale del personale sanitario per poter intraprendere un'azione di carattere etico. L'etica cattolica, da parte sua, possiede presupposti eccessivamente vincolanti (dato rivelato, autorità del Magistero cattolico) per poter risultare condivisibile da un largo numero di persone; inoltre propriamente assegna dignità all'uomo solo in maniera indiretta e derivata dalla dignità del Creatore.

3. Elementi della moderna antropologia filosofica

Una diversa concezione del valore del «composto umano», qual è quella postulata ad esempio da Arnold Gehlen, può rappresentare una valida base di partenza per ripensare alcune questioni di bioetica. L'«antropologia elementare» di Gehlen prende le mosse dal presupposto fondamentale per cui ciò che è spirituale nell'uomo trova una radice profonda nella sua morfologia corporea. Questa radice non dev'essere però intesa nel senso fisiognomico – così diffuso nella filosofia romantica e in tutto l'Ottocento, tanto da restare a fondamento di una ben nota scuola crimonologica – che l'esteriore sia espressione e forma dell'interiore. Una simile concezione è smentita ovunque dall'esperienza[12].

Piuttosto il corpo dell'uomo è per essenza «manchevole», ipodotato dalla natura sia per quanto riguarda i suoi strumenti di difesa che di attacco, e questa mancanza rappresenta il punto di partenza per il suo sviluppo culturale: l'uomo ha dovuto rispondere con strumenti culturali alla propria insufficienza fisica. L'uomo quindi, in forza della propria costituzione materiale, sorge come essere spirituale, l'unico essere spirituale della terra, e in questo senso per Gehlen non ha alcun significato parlare di uomo allo stato di natura, inteso nel senso della privazione di ogni struttura culturale[13].

Ora, secondo l'antropologia gehleniana, le condizioni fisiche non rappresentano affatto la *causa* delle disposizioni spirituali. Non vi è alcuna possibilità di applicare qui un concetto causale che sia anche lontanamente affine a quello delle scienze naturali, in quanto esso sarebbe sotto ogni riguardo troppo semplice e lineare per fornire

un'immagine fedele del composto umano. Piuttosto le condizioni fisiche dell'uomo rappresentano una *condizione di possibilità* del suo sviluppo spirituale, condizione che è *negativa* in quanto incarna una mancanza, una deficienza. Il fatto di non possedere *istinti* ineluttabili che, come negli altri animali, assicurino, ad ogni presentarsi di condizioni date, una reazione adeguata e per ciò stesso vincolata; il fatto, a ciò conseguente, di poter reindirizzare le proprie pulsioni in direzioni che risultano sempre *mediate* culturalmente; l'autocoscienza, che fa sempre di ogni organo – strumento che ci protrae verso l'esterno – soggetto (in quanto le agisce e le rende possibili) e oggetto (in quanto noi percepiamo il fatto che percepisce) delle nostre percezioni: tutto questo, in quanto ci conduce verso l'*azione*, verso l'atto decisivo del *se* e del *come* strutturare la nostra sopravvivenza, tutto questo ha come sua condizione una struttura corporea estremamente aspecifica e «buona per molti usi».

Non vi è, in una simile concezione, il rischio di declassare le più alte funzioni umane a livello di semplice «sovrastruttura» di una base corporea, ovvero di inclinare verso un puro ilozoismo? No, almeno seguendo il punto di vista dell'analisi gehleniana, in quanto, come si è visto, ciò che è «natura», «corpo», «fisicità» è sempre mediato da un elemento culturale, che trasforma ogni «ambiente» (*Umwelt*) in cui l'uomo vive in un «mondo» (*Welt*) che trascende il dato naturale. In questo senso secondo Gehlen, per utilizzare e parafrasare la nota espressione di Nietzsche, il corpo non si dà mai come *fatto*, ma sempre come *interpretazione di un fatto* attraverso una facoltà mentale «esonerata» (*entlastet*) dall'esaurirsi in risposte immediate all'ambiente circostante, che trova così nell'autocoscienza il principio basilare della propria azione[14].

La visione gelehniana è sicuramente del massimo interesse per il fatto che tenta di superare il dualismo mente-corpo, approdando ad un olismo che in bioetica risulta sempre più necessario, e recupera teoreticamente il valore del corpo, che viene inserito all'interno di un «mondo» al quale l'uomo non semplicemente si adatta, come l'animale, ma che trasforma attraverso la cultura e in qualche modo fa «suo».

Il corpo diviene così il *medium* tramite cui possiamo collegare il mondo interno delle nostre sensazioni, percezioni e riflessioni, e il mondo esterno composto da elementi inorganici, organici e altri uomini. Verso l'esterno, quindi, il corpo diviene un vero e proprio *mediatore di cultura*. Ora, però, questa cultura non può costruirsi se non attraverso il linguaggio. Per Gehlen il linguaggio non è altro che il simbolo significante il mondo, attraverso cui l'uomo può dire il mondo anche in assenza del mondo, con l'unico elemento sensibile rappresentato dai vari fonemi. L'uomo non ha bisogno di avere sempre presenti, tramite i cinque sensi, gli oggetti della propria percezione, ma può evocarli semplicemente chiamandoli; è questa la sua «potenza», significata anche dal primo comandamento del Decalogo, che impone di non esercitare invano la potenza evocativa della parola che sta per l'elemento significato[15].

Il linguaggio trova piena esplicazione in un sistema di comunicazione in cui vi siano più parlanti; il pensiero stesso, che è monologo interiore, deriva in «linea diretta» dal linguaggio, ed è «simbolo di simbolo»[16], è rivolto puramente all'interiorità. La cultura

umana espressa nel linguaggio si configura allora in primo luogo come una *cultura comunitaria*, che trova nel rapporto io-tu un suo fulcro imprescindibile di ricezione e trasmissione. La possibilità umana di elaborare un mondo possiede infatti due sorgenti: la prima sono le percezioni sensibili, la seconda la loro mediazione e rielaborazione attraverso la cultura. Questa, tuttavia, è sempre in primo luogo *tradizione*, ossia tramandamento, ed è legata perciò all'insegnamento che ognuno riceve nei primi anni di vita, e che costituisce l'educazione, l'esser «tirati su» da parte di altri uomini. Ciò spiega il periodo estremamente protratto dello svezzamento dei cuccioli d'uomo. *L'appartenenza dell'uomo alla comunità umana* ha dunque in primo luogo un significato legato alla sopravvivenza e alla possibilità di vivere nell'ambiente costruendosi un «mondo».

Gehlen si riferisce in più passi ad Herder, nel momento in cui cerca un sostegno alla sua teoria dell'uomo come essere fondamentalmente «manchevole» (*Mängelwesen*)[17], che è inserito, socialmente e poi anche moralmente, all'interno dell'«umanità» (*Humanität*), come lo stesso Herder rende esplicito nelle sue *Briefe zur Beförderung der Humanität*. Tale ripresa di temi herderiani trova evidenti punti di convergenza anche con le contemporaneee ricerche di Helmut Plessner, contenute soprattutto nel volume *I gradi dell'organico e l'uomo*[18], di cui Gehlen fa esplicita menzione nel suo lavoro principale[19]. Plessner in ogni modo, criticando lo «strapazzamento» che Gehlen avrebbe fatto del concetto herderiano di *Mängelwesen* – che a suo dire possiederebbe una «limitata forza trainante»[20] – non ritiene opportuno focalizzarsi principalmente sull'«esonero» generato dalla prevalenza degli organi della vista e dell'udito e in seguito dal linguaggio e dal pensiero, ma sulla nozione di uomo come animale dalla «posizionalità eccentrica»[21].

Questo concetto del porre (*setzen*), della posizione (*Setzung*), che rimanda all'«essere innalzato» e insieme allo «stare», degli organismi viventi si trova in un certo senso in contrasto con quella gehleniana in quanto ne rappresenta la controparte positiva. Non si prendono stavolta le mosse da una privazione, ma dal trascendimento positivo, appunto, di un limite che inerisce ad ogni vivente – il limite che lo definisce, che lo perimetra – e che, in quanto concetto logico prima che fisico, può essere travalicato. Ogni organismo vivente diviene ciò che ha da essere (al contrario del semplice corpo fisico, che solamente «è») superando il limite che gli inerisce a partire dal proprio centro, al quale rimane per sempre vincolato. Anche l'uomo diviene e supera il proprio limite, ma in modo «eccentrico», svincolato e imprevedibile, perché, attraverso l'autoriflessione – processo sempre inconcluso e che va *ad infinitum* – egli si fa *oggetto* e spettatore di se stesso, acquisendo così la capacità di partirsi anche dal proprio centro, di posizionarsi «dietro» di esso[22].

Il corpo dell'uomo, inteso come unità psico-fisica, è quindi per Plessner limite e capacità, logica e fisica, di trascendimento del centro, ed assolve la propria essenziale «funzione mediatrice» tra centro e periferia. Tale potersi trascendere pone l'uomo in una forma extra-istintuale di equilibrio instabile, a cui egli deve rispondere con gli strumenti della cultura.

Le antropologie di Gehlen e Plessner, pur riconoscendone i meriti, si pongono in contrasto esplicito con la visione di Max Scheler, soprattutto nel non voler accettare alcuna premessa metafisica, e nel rifiutare in maniera marcata la nozione di «spirito» in riferimento all'uomo, la quale rimanda al dualismo, esecrato, di spirito e materia. Nondimeno, si possono elencare una serie di aspetti centrali che Scheler condivide con gli altri due grandi antropologi, e che ci serviranno da base per le nostre ulteriori considerazioni in ambito bioetico. Per Scheler l'uomo è, innazitutto come essere che possiede lo spirito,

> *colui che sa dir di no, l'asceta della vita,* l'eterno *protestatario* di ciò che è soltanto realtà. In rapporto all'animale... l'uomo è l'eterno Faust, la *bestia cupidissima rerum novarum*, mai paga della realtà circostante, sempre avida di infrangere i limiti del suo essere ora-qui-così, sempre desiderosa di trascendere i limiti della realtà circostante: e con ciò anche i limiti della propria realtà personale presente[23].

Questo «dir di no» alla realtà costituisce per Scheler la via che porta ad una profonda comprensione fenomenologica degli elementi dell'ambiente e di se stesso che l'uomo non realizza, come nella fenomenologia husserliana (da cui pure il nostro autore prende le mosse), attraverso l'*epoché*, ma attraverso l'annullamento, per tentativi successivi, dello stesso momento della realtà. Ora, questa negazione del momento della realtà porta l'uomo a doversi domandare quale sia il suo posto nel mondo, e questa domanda lo conduce, seguendo Scheler, necessariamente ad interrogarsi sul principio stesso della realtà, che nell'ultima fase del suo pensiero si incarna in un principio metafisico areligioso.

Tale principio, lo spirito, fonda, insieme all'impulso vitale, quel che per Scheler è la *persona*. La persona è ciò che caratterizza il composto psico-fisico umano informato di spirito. Ora, questo spirito coincide con la possibilità e la realizzazione di atti intenzionali da parte del soggetto, atti che, nella sfera etica, puntano alla realizzazione di valori; questi, nell'ottica scheleriana, costituiscono un *a priori materiale*, che si oppone da un lato all'astratto formalismo kantiano e dall'altro allo psicologismo privo di valore universale. La persona non è un «io» oggettivabile e psicologizzabile, ma sempre un'autocoscienza che partecipa dei propri atti e che in sé non è scientificamente analizzabile. Della persona non fa parte il corpo fisico-*oggettivo* (*Körper*), che è solo uno strumento mediatore verso il mondo; fa invece parte il corpo fisico-*soggettivo* vissuto ed esperito (*Leib*), che costituisce il perno dell'autocoscienza personale[24].

La persona si trova al centro di una serie di relazioni, la cui più alta forma è per Scheler l'amore; esse hanno carattere oggettivo, essenziale ed universale, e costituiscono un elemento imprescindibile nella determinazione dell'autonomia personale.

4. Per un'interpretazione antropo-filosofica della bioetica

Mi pare che sia possibile porre in rilievo alcuni elementi caratterizzanti le tre antropologie, che, a mio parere, possono venir recuperati nella costituzione di un'etica sanitaria efficace e conforme alle esigenze attuali.

- Considerazione del corpo come condizione (ma non causa) dello «essenza» umana. Il corpo rappresenta il *medium* tra cultura e natura, e porta con sé l'eredità genetica del genere umano.
- Enfasi sulla comunità umana, la sola in cui l'uomo possa realizzare quella cultura che gli consente di sopravvivere nell'ambiente. Essa è comunità genetica e culturale, entro cui solo ha senso parlare di autonomia individuale.
- Uomo come «essere che diviene», come possibilità vivente di trascendimento delle proprie condizioni date.

Cominciando dal primo elemento per poi prendere in considerazione contestualmente anche gli altri, nei confronti delle attuali istanze della ricerca bioetica mi pare assai opportuno porre l'accento sul «corpo che siamo»[25]: ogni pratica medica deve tener conto che qualsiasi intervento sul fisico coinvolge sempre già la peculiarità dell'uomo. Ciò non è di solito tenuto nel debito conto. Quando ad esempio si discute della ricerca di cellule staminali embrionali, da parte laica ci si concentra solamente sul fatto se l'agglomerato cellulare possa o meno percepire dolore, mentre da parte cattolica la preoccupazione risiede solo nel fatto se esso manifesti o meno l'infusione dell'anima razionale, oppure si dà per assodato che la possieda *ab initio*, ma in questo modo sovente si tende ad equiparare tale «anima» al corredo cromosomico, non potendo tutelare in altro modo «oggettivo» la «personalità» della vita nascente; tuttavia si cade così facilmente nella deriva traduciano-materialistica, che non può armonizzarsi col personalismo ontologico di matrice tomista sostenuto dalla Chiesa in ambito bioetico[26].

Seguendo le categorie dell'antropologia filosofica moderna il corpo dell'uomo, in quanto tale e per se stesso, è umano già in quanto insieme cellulare strutturato in un determinato modo, *more humano*, anche nei suoi stadi embrionali. Quella strutturazione, cioè, diviene *necessaria condizione* per l'uomo, e quindi già umana in se stessa. L'embrione inoltre è legato al genere umano per il fatto di avere in sé le caratteristiche genetiche della specie. La sperimentazione su di esso è una sperimentazione già sull'essere umano. Non importa qui introdurre il concetto di «persona» e nemmeno di «individuo», basta quello di «uomo». La legittimazione della sperimentazione non dipende dal fatto se l'assenza della stria primitiva escluda ogni possibile dolore; non dipende nemmeno dal fatto se l'embrione sia «persona», ovvero se possieda un'anima. Queste questioni aggirano il problema, sia perché legittimano l'intervento sull'uomo solo a partire da un'algometria che si pretende oggettivabile, sia perché vincolano la tutela dell'embrione ad una deontologia basata su una fede non condivisibile da tutti e che in fondo non tutela l'uomo in sé, ma l'integra sovranità del Creatore sulla creatura. Anche la determinazione dell'individualità somatica diviene problematica, nel momento in cui non è peculiare soltanto del genere umano e risulta difficilmente affermabile a certi stadi dello sviluppo ontogenetico, quando vi è ancora la possibilità della poliembrionia[27].

L'appartenenza al genere umano, che deve essere fermamente affemata come

appartenenza di specie[28], fonda invece una nozione di responsabilità che rimane intimamente connessa a quella di giustizia (*dike* in senso ippocratico). Se il corpo dell'uomo è *condizione* dell'umanità, operare su quel corpo non mette in gioco soltanto la responsabilità del singolo medico o dei congiunti, ma la giustizia, ovvero il rispetto del *modus humanus* di fronte al *consessus hominum*, ciò che propriamente fonda la nozione di *ius* [29]. È precisamente nella trascuratezza di questo punto che si fonda la debolezza dell'etica laica: essa rimane estrememente individualista, e propone una nozione dell'etica che, fondandosi in prima istanza sull'autonomia, tralascia del tutto l'aspetto comunitario dell'agire morale. In questo senso l'etica cattolica della *lex naturae* risulta meno deficitaria, ma parimenti inefficace, nel momento in cui da un lato individua il deposito di quella *lex* universalmente nel cuore di ogni uomo (secondo il testo paolino della *Lettera ai Romani*), ma dall'altro vincola la sua interpretazione e comprensione al dettato (che in certa misura risulta deresponsabilizzante) dell'autorità magisteriale.

Per tornare al nostro esempio, dal punto di vista delle categorie dell'antropologia filosofica moderna, esperimenti sull'embrione sono possibili, certamente, ma non risultano eticamente *neutri*. Sono possibili in quanto rappresentano un progresso culturale dell'umanità stessa (nel senso della plasmazione di un mondo umano), ma trovano il proprio limite nel fatto che hanno sempre un carattere sacrificale. Chi li organizza si trova a doverne rispondere all'umanità, non solo presente, ma anche futura, nel momento in cui arrischia operazioni sull'uomo che generano delle conseguenze sia nel presente sia nell'avvenire, indipendentemente dai risultati, semplicemente in quanto precedenti che gettano un ponte tra l'astrattezza progettuale della teoria e la realizzazione della pratica[30]. Solo questa concezione, credo, è in grado di alleviare quella «solitudine etica»[31] che spesso viene confusa col principio di autonomia. Autonomia infatti non può, in senso laico, significare semplice autoreferenzialità, ovvero «libertà da vincoli» (pur se nel rispetto della libertà altrui); da parte cattolica, l'autonomia pensata all'interno della *lex naturae*, che si pretende immutabile, è d'altronde frutto dell'incontro tardo-antico tra cristianesimo ed etica stoica e non può pretendere di avere alcun valore universale ed eterno – per non dire dei problemi, sopra citati, generati alla coscienza autonoma dalla interpretazione autoritativa di quella legge. Autonomia può significare solamente libertà di scelta nel rispetto della giustizia verso l'umanità, i cui componenti vanno intesi come enti necessitati sempre a dover rinegoziare la propria esistenza, come enti eternamente insoddisfatti e di là da venire, a cui mal si addice ogni fissità culturale.

Gli uomini, seguendo l'antropologia filosofica moderna, si creano «mondi» composti da costellazioni culturali e valoriali, che risultano però costitutivamente «aperte» e soggette esse stesse al mutamento. Che l'uomo risulti «eccentrico» nel senso di Plessner, oppure «aperto al mondo» nel senso di Gehlen, oppure una «*bestia cupidissima rerum novarum*» nel senso di Scheler, significa esattamente questo. L'uomo per sopravvivere *ha da essere autonomo*, non possiede istinti che lo guidino; nondimeno questa autonomia non riguarda il singolo, bensì il genere, perché essa risulta vincolata all'eredità fisica e

spirituale genericamente umana. In questo modo mi pare abbia un senso compiuto l'essere legge a se stessi, se esso non deve significare un agire puramente arbitrario o una responsabilità mediata da un'autorità superiore.

5. Conclusioni

Non è questa la sede per esporre una serie di princìpi bioetici a partire dalle categorie dell'antropologia filosofica. Qui si voleva solamente indicare una strada e un possibile punto di partenza, che naturalmente potrebbe anche risultare aporetico. Vorrei tuttavia concludere, a titolo di esemplificazione di quanto detto sinora, esaminando in breve, attraverso le categorie antropo-filosofiche, un caso di aborto terapeutico operato su un bimbo sano.

In un ospedale fiorentino una donna ha recentemente deciso di abortire al quinto mese di gravidanza, perché il feto viene sospettato di una atresia esofagea (interruzione del tratto esofageo, spesso con confluenza nella trachea); la donna sostiene che questa supposta malformazione – che al momento dell'aborto è risultato un falso positivo – le avrebbe procurato un disagio psichico tale da non permetterle di crescere il bambino, anche se da un punto di vista clinico la sopravvivenza dei nascituri in queste situazioni è stimata all'80%. Il bambino viene estratto vivo, e si cerca di rianimarlo. Muore dopo alcuni giorni[32].

Da un punto di vista legale, la Legge 194 ha consentito un aborto così tardivo, rispettando l'autonomia decisionale della madre sulla base di un referto medico e della sua convinzione (diffusa tra l'altro in molte famiglie) di non poter far fronte a gravi malformazioni del neonato. Secondo le norme della bioetica laica l'interesse della madre (un «agente morale» per dirla con Tom Regan[33]) risulta superiore a quello del bambino (un «paziente morale»). Secondo la visione cattolica, invece, quella vita, in quanto dono di Dio, pur se malformata, possiede un valore che nessuna istanza della madre può ledere o sopprimere.

A mio modo di vedere questo caso risulta emblematico nel senso della «solitudine etica». La capacità decisionale della madre si volge qui su un terreno che le risulta completamente inesplorato: quello della possibilità teorica di allevare un figlio con possibili malformazioni. La sua decisione si può basare solo su quello che conosce in base ad analisi strumentali sul feto e alla previsione di quali potrebbero essere le sue proprie reazioni di fronte alla nascita di un figlio malato.

Entrambe queste basi sono tuttavia solo probabilistiche e non decisive. Se la donna non è religiosa, certamente non può esserle d'aiuto nemmeno la considerazione cattolica della sacralità derivata del feto. Tuttavia lei non potrà dubitare per un momento che suo figlio appartenga al genere umano, geneticamente e anche culturalmente e socialmente, in quanto la sua nascita è attesa e preparata da un contesto sociale determinato. Questo contesto fa già di quell'esistenza fetale un *bios*[34], una vita vissuta e irripetibile calata in un mondo che si stava preparando ad accoglierla. A cosa rinuncia, quindi, rinunciando a dare alla luce quella vita? Semplicemente a probabili sofferenza future? Ad un paziente

morale, o ad uno *zoe* che non avrà (probabilmente mai) la possibilità di condurre innanzi un *bios*?

In realtà in questo caso (ed è un'altra delle grandi questioni bioetiche) la certezza della morte del feto abortito viene barattata con la probabilità della sua malformazione e la probabilità di un futuro disagio della madre. Questo baratto non solo impedisce lo sviluppo futuro di una vita biografica, ma interrompe uno svolgimento già presente. Infatti avere una vita significa, a partire dal corpo fisico, (a) costituire, in tutto l'arco del processo ontogenetico, una corporalità propria, che è intima, irripetibile sin dal principio e (b) che risulta in ogni momento trascendente la situazione data semplicemente fisico-psicologica. È in base a tale situazione che in realtà non possiamo mai decidere chi è persona e chi non lo è, essendo questa una realtà intima propria della consapevolezza di ogni uomo.

Le decisioni che dovranno essere prese in ambito biomedico si devono porre a partire dalla consapevolezza che nessun quadro teorico (metafisico o meno) è in grado di deresponsabilizzarci di fronte alle nostre azioni sull'uomo, né alcuna consierazione algometrica sugli embrioni o i feti, né alcuna autorità magisteriale. A quelle azioni si deve certamente procedere (non è pensabile il porre limiti apriori all'avanzare culturale-scientifico dell'umanità), ma dobbiamo sempre esser pronti a risponderne dinanzi al *consessus hominum*. La decisione della donna e del personale sanitario, se è legittima da un punto di vista legale ed esistenziale, proprio perché pare aver trascurato questa responsabilità mi sembra estremamente *indigente* e non può essere approvata.

La complessità del composto umano, complessità biologica, culturale e sociale insieme, deve educare ad un maggior star-di-fronte al genere umano. Questo star-di-fronte significa svincolamento dalla logica puramente individuale delle preferenze e disponibilità a far proprie empaticamente le prospettive del *consessus hominum*, in cui anche le proprie prospettive si inquadrano. È questo a mio modo di vedere un vincolo capace insieme di spezzare la «solitudine etica» e di risultare condivisibile. Esso potrebbe contribuire anche a fondare un'*antropologia medica* che consideri il corpo dell'uomo ed i suoi stati (la malattia, la salute, la morte) come parte concreta e irrinunciabile della vita che ognuno conduce. Guarire, così, non significherebbe semplicemente, per il medico ed il paziente, ristabilire uno *status quo ante*, riparare una macchina guasta, ma aver fatto un passo avanti nel divenire di sé dell'uomo (*Menschwerdung*, per adoperare una categoria scheleriana); ammalarsi, di converso, non sarebbe mai solo inceppamento e guasto, ma processo dell'esser vivi. Ciò che recentemente si sta cercando di proporre, ovvero una medicina *narrativa* che implementi la medicina basata sull'evidenza dei protocolli sperimentali, funzionerà solo se in quella narrazione vi sarà, da parte dei parlanti (personale sanitario, pazienti e congiunti), consapevolezza e responsabilità – dinanzi al *consessus hominum* – di fronte al valore precipuamente e complessamente umano di ogni vita[35].

NOTE

[1] Cfr. [21].

[2] Si veda su questo ad esempio [14] alla voce «giustizia sanitaria», pp. 146-149. Anche laddove la bioetica assegna un ruolo alla categoria di giustizia, com'è il caso del «principialismo» di Beauchamp e Childress, questa si configura sempre come rispetto delle «norme che stabiliscono di distribuire equamente benefici, rischi e costi»; cfr. [1] p. 48. È senz'altro vero che il principialismo ha il pregio di ammettere il *consensus omnium* o *maiorum* come base per una ridiscussione dei princìpi, ammettendo cioè la rinegoziabilità dei valori in sede comunitaria; nondimeno questa rinegoziaziazione possiede un carattere utilitaristico che ha rappresentato e rappresenta tutt'ora il maggior punto critico del presunto universalismo dei «quattro princìpi».

[3] Cfr. [20] pp. 1381-1387.

[4] Cfr. soprattutto la teoria del gene autoreferenziale o «egoista» esposta in [4].

[5] Lecaldano, nel suo *Dizionario di bioetica*, non fornisce una definizione generale di vita, ma si limita a elencarne le varie tematizzazioni, affermando infine che «sembra più corretto... considerare la nozione di vita come una nozione artificiale (o convenzionale) cui facciamo riferimento per distinguere fenomeni diversi della natura. In questi termini, i criteri esistenti tra esseri viventi e non viventi non potranno essere considerati oggettivi». Lecaldano fa poi appropriatamente notare che il semplice descrivere una realtà come vivente «non sembra essere sufficiente per attribuirle rilevanza morale»; si deve infatti ancora chiedersi se, data la nozione di vita che incorpora talune caratteristiche, esse, come dice Lecaldano, «siano rilevanti da un punto di vista morale»; cfr. [14] p. 327-328.

[6] È del tutto significativo che nei maggiori dizionari di bioetica non vi sia traccia di una voce «uomo», così come di «soggetto», che pure vengono usati con profusione (diverso invece il caso di «persona» o «identità personale», che talora risultano presenti, ma la cui applicazione è eccessivamente ampia, coinvolgendo anche il mondo animale, oppure è unilaterale, nel senso che considera come determinante per la «persona» la sola razionalità o la sola capacità morale o un assunto metafisico; cfr. [14] pp. 152-153 e 219-221). Anche laddove siano presenti voci antropologiche, queste per lo più si riferiscono all'antropologia medica. È proprio a livello fondazionale-definitorio che l'apporto dell'antropologia filosofica appare rilevante in bioetica, evitando monismi e mostrando la complessità del campo d'indagine.

[7] Questa attitudine olistica cerca di considerare come un tutto la dimensione fisica e quella spirituale dell'uomo, la *physis* in modo complementare allo *pneuma* ed alla *psyche*. Essa, problematizzando il tradizionale dualismo filosofico di mente-corpo, di anima e spirito non diviene una filosofia della mente, non tende ad occuparsi in modo sistematico dei rapporti mente-corpo o, meglio, mente-cervello per poter risolvere in qualche modo quel dualismo. Piuttosto essa lo considera un dato costitutivo dell'uomo riscontrabile nell'analisi empirica, e lascia ad altre discipline di indagarne le questioni specifiche.

[8] Cfr. [15], p. 269 in cui Claude Lévi-Strauss afferma: «Il fine ultimo delle scienze umane non consiste nel costituire l'uomo, ma nel dissolverlo». Solo in un senso ben preciso il processo di dissoluzione dell'uomo coincide con quello di dissoluzione della nozione di «soggetto», dissoluzione che ha trovato nell'archeologia antropologica di Michel Foucault il punto terminale di un lungo processo; cfr. [6], p. 414. Il senso è quello secondo cui la nozione di «soggetto»

risulta segnatamente moderna, per cui è corretto parlare soltanto di una dissoluzione dell'uomo *moderno* e non dell'uomo *tout court*.

[9] Chi si avvicina oggi alle scienze dell'uomo si imbatte in prima istanza nel concetto di *complessità*. La teoria della complessità, la cui origine rimonta innanzitutto all'omologo termine usato in logica computazionale, in termodinamica e in biologia, concepisce l'uomo come composto da svariate istanze, da molteplici «mondi», che stanno tra loro in un rapporto reciproco non lineare. Ma questa complessità non può venire intesa come disgregazione, come frammentazione dell'uomo nei suoi molti composti, perché in questo caso la somma delle parti non sarebbe mai capace di rendere l'intero. La caratteristica, invece, dell'antropologia filosofica moderna è quella di assumere *in toto* tale complessità attingendo il proprio materiale d'analisi dalle scienze empiriche e cercando poi di ricondurlo ad un'unità complessa attraverso gli strumenti del ragionamento filosofico; essa è, per dirla con Habermas, «un'interpretazione filosofica dei risultati scientifici» nell'ambito delle scienze umane; cfr [12] p. 20; cfr. inoltre anche [27] p. 257.

[10] In questo senso non fa eccezione nemmeno l'antropologia nietzscheana, che vede negli stati corporei di malattia e salute la precondizione per lo sviluppo dell'essenza diveniente dell'uomo. Molto presto infatti questi stati fisici assumono in lui una connotazione esplicitamente morale-assiologica, che tende ad ipostatizzarli e a fissarli in un ambito extra-fisico. La malattia diviene *décadence* e la salute «grande salute» necessaria per la trasvalutazione di tutti i valori.

[11] Per una panoramica delle correnti contemporanee dell'antropologia filosofica si può vedere [17], in particolare le pp. 3-29.

[12] Cfr. [10]

[13] Cfr. [9], p. 88: «'Uomini allo stato di natura', ossia privi di cultura, non esistono affatto».

[14] Cfr. [9] p. 98; sulla categoria dell'«esonero» in Gehlen cfr. [10] p. 89 ss. Eugenio Mazzarella, nella sua *Prefazione* a [9] lamenta una prevalenza, nel pensiero gehleniano, della *Welt* sulla *Umwelt*, al punto tale che quest'ultima risulterebbe quasi trascurata. È certo che all'interno della teoria gehleniana dell'azione il sostrato puramente biologico dell'agire umano risulta non indagabile nel suo specifico apporto alle funzioni superiori, ma deve sempre venir mediato dalla sfera culturale. Ciò che rappresenta il punto di forza della specie umana ne costituisce anche il limite: nell'indagine su se stesso l'uomo non è in grado di scorgere alcun elemento della *Umwelt* se non all'interno della *Welt.* Dunque vi è comunque una «indicibilità» del fondamento puramente aculturale dell'umano, in quanto il linguaggio, con cui l'uomo costruisce la cultura, non può mai andare oltre se stesso. Cfr. [ix] p. 49; sul linguaggio cfr. l'intera parte seconda di [10], e in particolare le «radici» del linguaggio pp. 229-270. La trascuratezza da parte di Gehlen dell'apporto della *Umwelt* all'uomo sarà oggetto anche della critica di Plessner sotto menzionata.

[15] Cfr. [7] pp. 507-508

[16] Cfr. [9] p. 134.

[17] Soprattutto Gehlen si riferisce al volume di Herder *Abhandlung über den Ursprung der Sprache* (cfr. [9] p. 88 in nota), e alla definizione qui contenuta dell'uomo come essere che è «compito a se stesso»; cfr. [10] p. 59.

[18] Cfr. [17].

[19] Cfr. [10] pp. 299-300.

[20] Cfr. [17] p. 15.

[21] Cfr. [17] pp. 312-368. In generale Plessner tende a considerare poco efficace la teoria dell'azione gehleniana, che si configura in primo luogo come «attività indirizzata alla modificazione della natura in vista degli scopi dell'uomo»; cfr. [11], p. 33; essa si baserebbe infatti totalmente sullo «iato» tra pulsioni e azione da esse determinata (lo iato generatore della coscienza), sul ruolo dominante del linguaggio e sul suo «esonero» dall'azione immediata, e con ciò trascurerebbe quei caratteri che l'uomo si porta dietro come grado speciale dell'organico: «Una concezione del tipo umano d'esistenza come evento naturale e prodotto della sua storia la si acquisisce con la sua contrapposizione ad altri e noti tipi d'esistenza della natura vivente. Perciò è necessario un filo conduttore, che ho individuato nel concetto di posizionalità, un carattere fondamentale, credo, attraverso il quale si distingue la forma animata da quella inanimata»; cfr. [17] p. 20. La rilevanza del dato naturale, fisico-psichico, ottiene la sua centralità nella terminologia plessneriana, che descrive rispettivamente il mondo esterno e interno dell'uomo come «corpo» e «corporalità»; cfr. [17] p. 318. Vedi anche [24] p. 63.

[22] Cfr. [17] pp. 314-315. «Come essere organizzato eccentricamente, l'uomo deve *anzitutto rendersi* ciò che *già è*... L'uomo vive solo nella misura in cui conduce una vita»; cfr. [17] p. 333.

[23] Cfr. [28] p. 159.

[24] Scheler tenta così di proporre «un nuovo tipo di personalismo»; cfr. [26] p. 8. In questo personalismo la categoria di «uomo» non coincide con quella di «persona», in quanto si danno uomini (bambini, dementi) che non sono persone, poiché incapaci di atti intenzionali; al contrario non è mai possibile per lui che si dia una persona non umana, in quanto solo l'uomo risulta soggetto di atti intenzionali; cfr. [26] p. 481.

[25] Cfr. [22]; per un'analisi sulla trattazione del corpo dell'uomo all'interno della storia della filosofia occidentale cfr. [8].

[26] Su tale personalismo si possono confrontare i lavori di Elio Sgreccia, ed in particolare [29] alle pp. 60-63 La più diffusa interpretazione del corpo in ambito di bioetica cattolica è quella aristotelico-tomista, secondo cui la materia deve risultare «predisposta» e quindi determinata a ricevere l'anima. L'anima è così «unita sostanzialmente al corpo». In questo senso la determinazione della materia umana costituisce già parte integrante del «composto» personale e ne riceve così dignità. Senza dubbio questa interpretazione si avvicina in molti punti alla visione antropo-filosofica moderna, ma se ne distanzia per un aspetto essenziale: il valore del corpo risiede nell'essere ordinato a qualcosa di più elevato; al corpo quindi non è consentito affezionarsi troppo, ed è lecito in taluni casi rinunciarvi in nome di un'istanza sovraordinata (ciò che si definisce come indisponibilità condizionata della vita). Nel motto scolastico *operari corporis sequitur esse animae spiritualis* si compendia efficacemente la natura della relazione tomistica corpo-anima. Questa concezione rispecchia del tutto la duplice tendenza, mai composta e incomponibile, presente nell'etica cristiana, della *laus corporis* e del *contemptus corporis*. Cfr. [29] pp. 105-130.

[27] Sulla concezione di individuo e dignità indviduale assegnata all'embrione cfr. quanto Vittorio Possenti sostiene in [19].

[28] Ciò sia detto contro l'antispecismo dichiarato di molte importanti correnti bioetiche, che

o equiparano («verso il basso») l'uomo agli animali, oppure, all'inverso, equiparano («verso l'alto») gli animali all'uomo. Per bioeticisti quali Peter Singer, John Rachels, Tom Reagan e anche Tristram Engelhardt la specie uomo è sicuramente qualcosa di antiquato ed essi in effetti la ripudiano oppure la riducono a pure definizioni inessenziali, quali appunto la capacità di autonomia morale. Cosa significa infatti possedere una possibilità etica di scelta se non è possibile basare questa scleta in modo più ampio rispetto alle preferenze individuali? Che senso ha qui usare il concetto di *nomos* (auto-nomia)? Possiamo essere veramente legislatori di noi stessi, quando né le condizioni materiali, né quelle culturali della nostra esistenza dipendono dalla nostra capacità decisionale, ma risultano vincolate ad una sfera più ampia, quella dell'umanità? Senza questa consapevolezza non rimane in realtà che l'individualismo etico e l'estraneità morale. Porsi all'interno della sfera umana significa invece agire autonomamente nel vincolo della libertà.

[29] Il diritto romano stesso, nella riordinazione giustinianea (*Digesta*, Libro I, titolo V), si occupa di tutelare i diritti del nascituro in quanto uomo, ovvero in quanto appartenente alla società degli uomini e in particolare alla *res publica*, come si stabilisce nel XXXVII libro dei *Digesta*, titolo IX § 15: «partui enim in hoc favetur, ut in lucem pro ducatur; puero ut in familiam inducatur; partus enim iste alendus est, qui [et] si non tantum parenti, cuius esse dicitur, verum etiam Reipublicae nascitur»; cfr. [2], pp. 167ss e 196ss. Vedo nell'appartenenza comunitaria e statale di ogni uomo una delle patenti difficoltà di far approvare leggi sull'eutanasia attiva; esse lederebbero il diritto statale di tutela dei propri cittadini.

[30] Cfr. le considerazioni portate avanti da Habermas in [13].

[31] Non posso chiamare in altro modo la concezione di «estraneità morale» presentata da Engelhardt e perfettamente coerente con la prevalente visione individualistica dell'etica, la quale pretende di fondare una comunione morale semplicemente su principi razionali di carattere contrattualistico e procedurale. Cfr. [5] p. 59.

[32] Cfr. [3] e [16].

[33] Cfr. [25] pp. 140, 214-216.

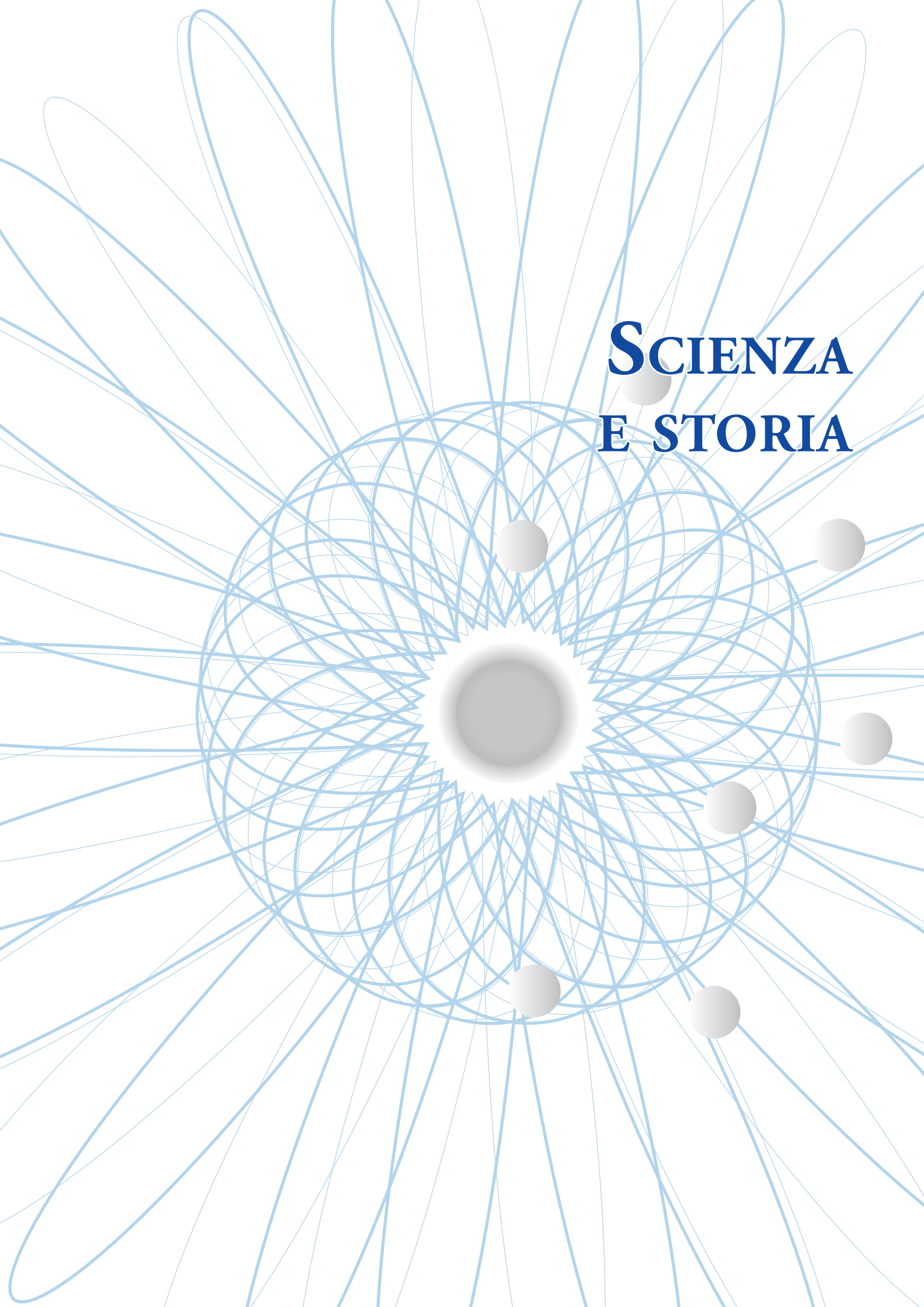
[34] Adopero qui la distinzione di James Rachels tra *zoe* e *bios*, ovvero tra vita biologica e vita biografica. Egli sostiene che ogni essere vivente non solo *è* una vita, ma *ha* una vita, e questa è fatta di progetti, aspirazioni, relazioni sociali. Da parte mia, tuttavia, desidero sottolineare da un lato il carattere sociale e non solo individuale-esistenziale del «condurre una vita», e dall'altro il fatto che *zoe* e *bios* non rappresentano un dualismo, ma si compenetrano essenzialmente, talché non è corretto dire, con Rachels, che «uccidere non implica la distruzione di una vita» nel caso di persone «in coma irreversibile» o di bambini con «malformazioni tali da impedire loro uno sviluppo adeguato»; sulla base di questo argomento Rachels legittima l'eutanasia. Cfr. [23] p. 11. Lo *zoe* è già il *bios* e il *bios* è sempre *zoe*.

[35] Cfr. le considerazioni svolte in [30]. In questo volume si esprime fortemente l'esigenza di de-oggettivizzare la medicina, affinché sia possibile curare il malato e non la malattia, e affinché il personale sanitario riesca in questo modo non semplicemente a guarire, ma anche a «prendersi cura». L'intenzione della «medicina narrativa» presuppone tuttavia un'antropologia profondamente «umana» nel senso che qui si è cercato di riproporre.

BIBLIOGRAFIA

[1] Beauchamp T. L. - Childress J. F., *Princìpi di etica biomedica*, Le Lettere, Firenze 1999.
[2] Catalano P., *Diritto e persone. Studi su origine e attualità del sisetma romano*, I, Giappichelli, Torino 1990.
[3] Cavadini F., Bambino vivo dopo l' aborto. Scontro sulla diagnosi sbagliata, in *Corriere della Sera*, 8/03/07, pp. 22-23.
[4] Dawkins R., *Il gene egoista: la parte immortale di ogni essere vivente*, Mondadori, Milano 1995
[5] Engelhardt H. T., *Manuale di bioetica*, Il Saggiatore, Milano 1990[2].
[6] Foucault M., *Le parole e le cose*, Rizzoli, Milano 1967.
[7] Gadamer H. G., *Verità e metodo*, Fabbri, Milano, 1972.
[8] Galimberti U., *Il corpo*, Feltrinelli, Milano, 1997
[9] Gehlen A., *Antropologia filosofica e teoria dell'azione*, Guida, Napoli 1990.
[10] Gehlen A., *L'uomo, la sua natura e il suo posto nel mondo*, Feltrinelli, Milano 1990.
[11] Gehlen A., *Prospettive antropologiche*, Il Mulino, Bologna, 2005.
[12] Habermas J., *Antropologia*, in AAVV, *Filosofia*, Feltrinelli, Milano 1966.
[13] Habermas J., *Il futuro della natura umana: i rischi di una genetica liberale*, Einaudi, Torino 2002
[14] Lecaldano E., *Dizionario di bioetica*, Laterza, Roma-Bari 2002.
[15] Lévi-Strauss C., *Il pensiero selvaggio*, Il Saggiatore, Milano 1970.
[16] Marrone C., Morto il bimbo sopravvissuto all'aborto. Aperta un' inchiesta, è scontro politico, in *Corriere della Sera,* 9/03/07, pp. 22-23.
[17] Pansera M. T., *Antropologia filosofica. La peculiarità dell'umano in Scheler, Gehlen e Plessner*, Mondadori, Milano, 2001
[18] Plessner H., *I gradi dell'organico e l'uomo, Bollati Boringhieri*, Torino 2006.
[19] Possenti V., Individuo umano e persona, in *www.portaledibioetica.it.*
[20] Post G. (a cura di), *Encyclopedia of Bioethics*, 5 voll., MacMillan Reference Books, New York 2003[3].
[21] Potter, V. R., *Bioethics:* The science of survival, in *Perspectives in Biology and Medicine*, 1970, 14(1), pp. 127-153.
[22] Prini P., *Il corpo che siamo*. *Introduzione all'antropologia etica*, SEI, Torino 1991.
[23] Rachels J., *La fine della vita. La moralità dell'eutanasia*, Sonda, Torino 1989.
[24] Rasini V., Filosofia della natura e antropologia nel pensiero di Helmut Plessner, in *Annali del Dipartimento di Filosofia*, Università di Firenze, 1995, vol. 1, pp. 59-77.
[25] Regan T., *I diritti animali*, Feltrinelli, Milano 1990.
[26] Scheler M., *Il formalismo nell'etica e l'etica materiale dei valori*, S. Paolo, Milano 1996.
[27] Scheler M., Uomo e storia, in Id, *Lo spirito del capitalismo e altri saggi*, Guida,

Napoli 1988.
[28] Scheler M., *La posizione dell'uomo nel cosmo e altri saggi*, Fabbri, Milano, 1970.
[29] Sgreccia E., *Manuale di bioetica*, Vita e Pensiero, Milano 2003.
[30] Spinsanti S. (a cura di), *Bioetica e antropologia medica*, La nuova Italia scientifica, Roma 1991.



Scienza e storia

Il neolitico e l'età dei metalli in Toscana:
sviluppi culturali e strategie insediative

Renata Grifoni Cremonesi

Dipartimento di Scienze Archeologiche, Università di Pisa

1. Il Neolitico

Il Neolitico, cioè il periodo della storia umana che vede l'insorgere di un'economia produttiva, basata sulla domesticazione delle piante e degli animali, nasce nel Vicino Oriente, in quella che viene chiamata Mezzaluna fertile, tra Siria-Palestina e i Monti Zagros, dove esistevano orzo e grano selvatici e capre selvatiche, non presenti invece in Europa. Il lungo processo che portò alla domesticazione, detto «di neolitizzazione», si sviluppò in queste zone tra il X e l'VIII millennio a. C. e portò gradualmente al formarsi di villaggi stabili vicini ai campi coltivati, presso corsi d'acqua; la raccolta prima e poi la domesticazione dei cereali portarono alla necessità di creare nuovi strumenti, quali asce e accette in pietra levigata, macine, falcetti, e silos per la conservazione dei cereali. La domesticazione dei caprovini portò altre innovazioni, quali la tessitura e quindi la creazione di telai, fusi, fusaiole, e anche la produzione di latte e dei suoi derivati.

La ricchezza raggiunta con il nuovo tipo di economia portò al sorgere di villaggi complessi, con case rettangolari, spesso adorne di pitture e sculture, e santuari; portò anche al formarsi di un'intensa rete di scambi a lunga distanza relativa all'approvvigionamento delle nuove materie prime usate oltre alla selce, e cioè ossidiana, rocce dure, bitume, forse sale, e allo scambio con beni di prestigio, come pietre pregiate per ornamenti. Infine ebbe molta importanza la navigazione su lunghe distanze che permise di giungere in territori lontani e nelle isole. L'altra grande innovazione tecnologica, cioè la ceramica, apparve solo verso gli 8000 anni da oggi.

In Italia il Neolitico giunse all'incirca 8000 anni fa, quindi con un certo ritardo rispetto al Vicino Oriente e gruppi di agricoltori allevatori arrivarono sia per via marittima, attraverso l'Adriatico, che con una diffusione continentale, mediata dai Balcani [6], [24]. Soprattutto lungo la costa adriatica, dalle Marche alla Puglia, e in Basilicata sono numerosi i villaggi, spesso circondati da grandi fossati e dotati di strutture quali capanne rettangolari con pareti di pali e frasche intonacate, silos, forni di argilla, pavimentazioni di ciottoli, ed è possibile seguire tutto lo sviluppo del Neolitico dagli inizi fino alla fase finale. L'inizio del Neolitico è contraddistinto in tutto l'occidente Mediterraneo da ceramiche decorate a impressioni ottenute mediante margini di conchiglie o unghiate sulla pasta ancora molle del vaso (ceramica impressa).

Lungo la costa tirrenica centro settentrionale si sviluppò un aspetto particolare

della ceramica impressa, detta di tipo cardiale, dall'uso della conchiglia *Cardium,* che è comune a tutto l'areale medio tirrenico, alle isole, al Midi francese e alla penisola iberica [14], [15].

Questo aspetto è noto lungo tutta la costa da Pisa al Tevere, nonché in vari siti di abitato nell'Alto Lazio, in grotte e abitati del Senese, a Pianosa e all'Isola del Giglio: si vede dunque un'ampia diffusione del neolitico più antico in quasi tutta la regione toscana con ceramiche decorate a motivi cardiali spesso disposti in bande di linee formanti motivi geometrici. Le datazioni disponibili per questo aspetto in Liguria, nel Lazio e nelle isole, lo pongono tra i 7900 e 7300 anni da oggi.

I confronti più immediati sono quelli con l'area dell'arco ligure provenzale e con le isole maggiori, i rapporti con le quali sono confermati anche dal rinvenimento di concentrazioni di ossidiane lungo il cordone di dune costiere tra Pisa e Livorno [1]. Si tratta di varie centinaia di manufatti, provenienti dalle tre aree di produzione dell'ossidiana del Mediterraneo occidentale, cioè Lipari, Palmarola e il Monte Arci in Sardegna. La presenza di ossidiana sarda e la somiglianza delle ceramiche impresse toscane con quelle sarde e corse pongono quindi con ampio risalto il problema della diffusione del Neolitico nell'area medio e alto tirrenica e quello delle possibili vie marittime di comunicazione. La costa pisano livornese sembra essere stata un punto di approdo di tre diverse rotte e, per quanto concerne i rapporti con la Sardegna, verrebbe ad essere confermata l'ipotesi di una rotta Sardegna - Corsica - Elba - costa toscana, come il tragitto più breve verso il continente e che si sarebbe poi diretta verso Nord, come testimoniano le ossidiane sarde rinvenute nelle regioni settentrionali italiane e in Francia meridionale, mentre la presenza di ossidiane liparesi e pontine anche all'Isola del Giglio e Pianosa indica contatti con il meridione d'Italia e conferma l'importanza delle isole in una rete di scambi che collegava aree distanti [27].

La Toscana quindi, durante il Neolitico antico, fa parte di un'ampia area culturale decisamente rivolta verso occidente mentre scarsi sono gli apporti dalle aree culturali meridionali e medio-adriatiche.

Il momento successivo del neolitico è rappresentato da una ceramica decorata a linee incise che si situa in un arco di tempo compreso tra i 7500-7200 anni da oggi ed è diffusa, con aspetti locali, in Veneto, Emilia, Toscana e Lazio [6], [14], [17], [19]. La Toscana ha restituito testimonianze piuttosto importanti: nell'areale Nord, in vari siti della Garfagnana, nel sito di abitato di Mileto presso Firenze e nel territorio pisano sono stati rinvenuti materiali che indicano precisi contatti con la cultura di Fiorano dell'area padana. Nel senese si sviluppa invece un aspetto particolare individuato alla Grotta dell'Orso di Sarteano e in altre grotte, che si discosta, per alcune differenze delle forme vascolari e delle decorazioni, sia dall'aspetto di Fiorano sia da quelli laziali denominati del Sasso di Furbara [4], [12], [17], e di Montevenere, quest'ultimo anche con ceramiche dipinte. Frequentazioni sono attestate anche lungo la costa e nell'isola di Pianosa [27].

Viene così a delinearsi un'area che ha contatti con il Lazio ma che recepisce nel

frattempo elementi sia da Nord sia dall'Italia centrale adriatica, come è attestato dalla presenza di ceramiche dipinte delle culture abruzzesi di Catignano e di Ripoli nel sito di abitato di Pienza e in alcune grotte toscane e umbre e che testimoniano quindi una vasta rete di contatti, lasciando intravedere l'esistenza di una più ampia diffusione del neolitico nella regione. Mentre per il periodo precedente non abbiamo finora in Toscana e nel Lazio dati sulle sepolture, ora si conoscono alcune testimonianze funerarie da grotte, con presenza di macine spalmate di ocra rossa, oggetti di ornamento come anelloni e pendagli in pietra od osso e, nelle zone al confine con Lazio e Umbria, si hanno deposizioni cultuali di vasi attorno a laghetti o sotto fonti di stillicidio in grotte labirintiche. [8]

Ben documentato è il momento successivo del neolitico, soprattutto nella Toscana settentrionale, con aspetti riferibili alla cultura di origine francese di Chassey e a quella della Lagozza dell'Italia settentrionale, che hanno un'ampia diffusione nell'Italia settentrionale e centrale. Questi aspetti sono caratterizzati da ceramiche nere lucide, con decorazioni a graffito fine e anse tubolari spesso disposte in serie [14,19]. Conosciamo per ora resti nelle grotte e ripari della Versilia e del pisano e alcuni siti di abitato tra Pisa e la zona di Firenze tra cui l'importante sito di Podere Casanova a Pontedera [4], con testimonianze anche lungo la costa e nel senese. In questo momento quindi la Toscana gravita soprattutto verso le aree settentrionali e verso quella ligure, pur avendo rapporti con le aree meridionali da cui recepisce influssi della cultura di Diana in forte espansione verso Nord, forse per il notevole incremento del traffico dell'ossidiana di Lipari. Abbiamo un'interessante testimonianza relativa a culti nella Grotta del Leone presso Pisa dove erano circoli di pietre con ossa umane e un focolare con deposizione di grano e orzo: questo tipo di rituale è noto anche in altre grotte dell'Italia centrale (come nella Grotta dei Piccioni in Abruzzo) e meridionale ed è legato forse a cerimonie in funzione dell'agricoltura. Le date disponibili indicano gli ultimi secoli del IV millennio a.C.

2. L'età del rame

Alla relativa scarsità di dati per il neolitico si contrappone la documentazione più ricca e varia delle culture eneolitiche, caratterizzate dalla presenza del rame, dalle sepolture collettive in grotticelle artificiali e dall'abbondanza di cuspidi di freccia e armi in pietra levigata, che attestano un più intenso popolamento della regione durante il III millennio a.C. [10,11]. Questo millennio rappresenta un momento di grandi impulsi e novità in tutto l'occidente Mediterraneo, con l'arrivo della metallurgia, già ampiamente nota in Vicino Oriente, e di nuove ideologie, riscontrabili nei mutamenti del rituale funerario e nelle raffigurazioni di armi e simboli solari nell'arte rupestre dell'arco alpino e sulle statue stele [2]

E'importante notare il cambiamento nel rituale funerario che durante il neolitico era caratterizzato da sepolture singole in fossa con corredi di vasi e macine e che ora vede apparire nelle sepolture collettive pugnali e accette di rame, asce martello in pietra levigata, cuspidi di freccia in selce, collane di grani di pietra o conchiglia, vasi e talvolta

resti di cani.

L'età del rame in Toscana [10,11] è nota soprattutto da sepolture, sia in grotte naturali sia in grotticelle artificiali «a forno». Le grotte naturali furono utilizzate a scopo funerario nella Toscana settentrionale e nel Senese grossetano.

Nella valle del fiume Fiora e nel Grossetano giunsero gruppi appartenenti alla cultura di Rinaldone, diffusa in Toscana meridionale e nel Lazio, e che si differenziano sia nel tipo di struttura funeraria caratterizzato dall'uso di tombe a grotticella artificiale, che nella produzione materiale, di cui tipico è il vaso a fiasco [21].

Rimane aperto il problema delle tombe a fossa, distribuite tra le Colline Metallifere, il senese e l'Umbria, più vicine al mondo di Rinaldone per la presenza di armi litiche e metalliche nei corredi, ma il cui rapporto con gli altri aspetti è ancora da definire.

Gli abitati sono meno noti, ma a Sesto Fiorentino è attestata una lunga frequentazione in villaggi piuttosto grandi dal neolitico medio e recente fino alla fine del periodo, caratterizzato dalla presenza, in tutta Europa, della cultura del Vaso Campaniforme [26]. Le ceramiche eneolitiche sono caratterizzate dalla presenza di vasi a fiasco, ciotole e tazze carenate e da ceramiche dalla superficie trattata a spazzola o a squame di argilla [19].

Si tratta quindi di un mondo che si sviluppa e articola in vario modo nell'arco del III millennio a.C. e i cui rapporti con le altre aree culturali sono connessi con i particolari ambienti geografici. Infatti, la Toscana nord occidentale ha più stretti rapporti con l'ambiente ligure provenzale e con la Valpadana: un'importante area di collegamento con queste regioni è costituita dall'eccezionale concentramento di statue stele nella Lunigiana, in cui la valle del fiume Magra è di estrema importanza per i collegamenti tra Toscana, Liguria e Valpadana. La Toscana meridionale vede invece rapporti con le culture meridionali e adriatiche: l'intenso popolamento durante l'età del rame ha fatto più volte avanzare l'ipotesi che esso fosse dovuto alla ricchezza mineraria della regione e collegato quindi con la ricerca di minerali e con attività estrattive [11]. Abbiamo scarsi dati in proposito ma tracce di antiche miniere di rame erano a Libiola presso Sestri Levante, dove nel secolo scorso furono rinvenuti strumenti in pietra e legno (un piccone in legno è stato recentemente datato col C14 a 2540+ 90 a.C.) Si hanno poi tracce di antiche miniere o rinvenimenti di manufatti in rame a Monte Loreto in Liguria, presso Arezzo, a Campiglia Marittima e a Massa Marittima. Cunicoli che seguivano i filoni di cinabro erano nelle miniere di mercurio del Monte Amiata e anche in essi furono rinvenuti strumenti da miniera, ma sono più sicuramente attribuibili al neolitico.

Che l'attività mineraria fosse ampiamente esplicata è arguibile, per la Toscana, dall'alto numero di asce e pugnali in rame rinvenuti su tutto il territorio regionale e particolarmente nelle zone minerarie. La Toscana offriva infatti una discreta quantità di minerali (in particolare rame e antimonio) e si possono notare concentrazioni nel Massiccio Apuano, nelle Colline Metallifere, nella zona di Massa Marittima e Gavorrano fino al fiume Fiora. Altre presenze di rame e antimonio sono all'Argentario e al Monte Cetona e vi è rame all'Elba e nel territorio tra Prato e Arezzo.

La Toscana quindi, pur non raggiungendo l'importanza di altre zone minerarie europee, dovette senz'altro attirare l'attenzione dei ricercatori di minerali. Ci manca però, esclusi il villaggio minerario di Campiglia [13] e quelli di Sesto Fiorentino [26], una buona documentazione sugli abitati e sulle attività economiche di base legate comunque ad attività di tipo agricolo, all'allevamento del bestiame e alla pastorizia.

Alla ricerca di materie prime si possono collegare, oltre ai manufatti in selce e pietra levigata, anche le officine di lavorazione della steatite per produrre elementi di ornamento, rinvenute nel Livornese e nella Liguria orientale.

Come si è detto,conosciamo poco i siti di abitato, meglio noti nel Lazio, ma,considerando anche le raccolte di superficie in siti distrutti dai lavori agricoli ed edilizi e le grotte, si può rilevare come i gruppi eneolitici avessero una preferenza per gli insediamenti in zone comprese tra 0 e 300 metri di altitudine, con la maggior parte dei siti in pianura o su basse colline e in minore quantità sui rilievi attorno ai 400-500 metri, mentre rare sono le testimonianze nelle zone più elevate. I villaggi sono in genere situati in prossimità dei corsi d'acqua o in zone umide [9].

Nella Toscana settentrionale, lungo la valle del Serchio e in numerose grotte e ripari della Versilia, oltre alle grotte usate per sepolture, esistono tracce di frequentazione stagionali dovute ad attività di caccia, pascolo o transito lungo i percorsi montani, che ci permettono di identificare percorsi verso l'Arno e il mare da un lato, e verso l'Emilia dall'altro, seguendo passaggi attraverso l'Appennino. Uno dei più importanti era sicuramente la Lunigiana, dove le numerose statue stele testimoniano un popolamento intenso con un'organizzazione sociale complessa.

La costa della Toscana nord occidentale mostra tracce di insediamenti nella periferia di Pisa, lungo la via che porta verso Lucca, e lungo la costa fino a Livorno [1,28], purtroppo distrutti da lavori agricoli e di urbanizzazione: questi siti controllavano sicuramente i percorsi che, seguendo la costa, collegavano i distretti minerari delle Apuane a quelli delle Colline Metallifere. A Campiglia è stato scoperto un sito con segni evidenti della lavorazione del rame che proveniva dalle vicine miniere [13].

Altri percorsi sono individuabili lungo la valle dell'Arno che dalla costa conduceva alla conca di Firenze dove esiste un'importantissima documentazione sul popolamento della zona dal neolitico all'età del Bronzo:a via Leopardi sono acciottolati che appartengono a strutture allungate, tipologia che continuerà per tutto l'eneolitico fino al Campaniforme, periodo per il quale si conoscono, a Querciola e Semitella, oltre agli acciottolati, anche buche di palo delimitanti capanne, fosse e focolari. Si tratta di siti molto estesi, di almeno 1000 mq e si sono potute evidenziare, grazie alle analisi dei pollini e dei macroresti vegetali, tracce evidenti di disboscamento per facilitare le attività agricole e di allevamento [26].

Analizzando le carte di distribuzione dei rinvenimenti [9], si nota che lungo tutti i fiumi, maggiori e minori, ci sono presenze dell'età del rame determinate in massima parte dalle risorse minerarie e dalla produttività dei terreni ma anche dalla facilità di comunicazione che le valli fluviali permettevano tra le varie zone della regione. Tra le

valli più importanti vanno ricordate la Val d'Orcia che conduce al Valdarno, al Monte Cetona e verso l'Umbria, la Val di Cecina che si dirige verso Volterra e la Valdera, e la valle dell'Ombrone. In tutte queste zone sono state rinvenute grotte e tombe a fossa con sepolture provviste di pugnali e asce in rame, di teste di mazza e asce in pietra levigata, e di cuspidi di freccia. Un'altra valle assai importante è quella del fiume Fiora che segna l'attuale confine tra Toscana e Lazio e che conduce ai distretti minerari del Monte Amiata: in questa valle sono numerosissime le piccole necropoli di tombe a grotticella artificiale della cultura di Rinaldone [21].

Si può quindi parlare di un popolamento massiccio, che investe anche l'isola d'Elba e in parte anche le altre isole dell'Arcipelago toscano, popolamento legato senza dubbio alla ricchezza mineraria e ad un ambiente assai favorevole, con pianure fertili e zone umide, basse colline, una rete di fiumi che permetteva facili passaggi attraverso tutta la regione e una serie di approdi che aveva sempre agevolato i contatti transmarini.

Per conoscere però meglio le tipologie di abitato bisogna ricorrere ai siti recentemente scoperti nel Lazio, dove l'insediamento si sviluppò soprattutto sulle colline a nord di Roma o in prossimità di piccoli corsi d'acqua nell'attuale periferia della città.

Il sito che ha fornito maggiori informazioni, sia sulle strutture abitative sia sulle forme di economia è quello di Le Cerquete di Fianello, nella piana di Maccarese a nord di Roma, piana bonificata nel secolo scorso ma che era fino ad allora paludosa, con piccoli laghi e una ricchissima vegetazione[18]. Il suolo fertile e le numerose risorse offerte dagli ambienti umidi permisero lo sviluppo di una comunità che abitava in grandi capanne delimitate da buchi di palo, con focolari, piccoli porticati e zone riservate al bestiame, silos per la conservazione delle derrate. Le ceramiche dell'abitato sono diverse da quelle che si ritrovano generalmente nei siti sepolcrali e sembrano appartenere a quella koiné culturale che caratterizza tutta l'Italia centro meridionale, con ceramiche a superfici scabre o decorate a incisioni e a punteggio, e che collega il Lazio e la Toscana con le culture meridionali di Gaudo e Laterza. Quest'ultima, tipica della Puglia e della Basilicata, giunge fino all'altezza del Tevere con veri e propri villaggi, ma elementi tipici della cultura si trovano in Toscana e fino in Liguria occidentale, testimoniando quindi un'intensità di contatti tra aree lontane

La presenza di pesi da telaio e di bollitoi indica un'economia la cui base fondamentale è agricola con una forte componente di allevamento, con bovidi, ovicaprini e suini. È possibile che la pratica della transumanza abbia giocato un ruolo importante per i contatti tra le diverse culture della penisola, con scambi non solo di materie prime e di oggetti di pregio, quali i manufatti in metallo, ma anche per la circolazione di idee.

In una grande fossa era stato sepolto un cavallo coperto da due cuccioli di cane: si tratta di una delle più antiche testimonianze in Italia della domesticazione del cavallo e la deposizione dei cani fa parte di un rituale noto fin dal neolitico nelle sepolture. Una sepoltura di bovide era invece a Semitella presso Firenze [26],e anche questa ci fa intravedere un mondo spirituale complesso che comprende numerosi simboli (soli, tori, armi, personaggi armati raffigurati nelle statue stele) dai quali sembra emergere

un'ideologia legata ad un mondo in cui i personaggi maschili armati potrebbero indicare un mutamento nelle strutture sociali, con la presenza di capi guerrieri.

3. L'età del bronzo

Nel momento finale dell'Età del Rame, alla fine del III millennio, cominciano ad apparire, come si è accennato, elementi nelle forme vascolari che preludono alla prima Età del Bronzo, quali vasi di tipo biconico e alte anse sopraelevate sugli orli, ma è difficile porre nette cesure tra i due periodi. L'antica età del Bronzo, agli inizi del II millennio, è documentata in Toscana da ripostigli di bronzi, soprattutto asce e panelle, presenti nel grossetano, nel senese e nel territorio settentrionale. Si hanno poi varie tracce di abitati in ripari o all'aperto lungo le coste e le valli interne di collegamento che indicherebbero un popolamento piuttosto intenso del territorio e che sono forse da porre di nuovo in rapporto con le aree minerarie [19,28].

Per il Bronzo antico si conosce una concentrazione di siti nella piana di Sesto Fiorentino e sulle colline intorno a Firenze, siti che si pongono in continuità con quelli del Vaso campaniforme, in una zona, come si è visto, ottimale per l'insediamento. Nel resto della regione vi sono molto siti, all'aperto o in grotta, molti dei quali continuano fino al Bronzo finale, soprattutto nella Toscana meridionale e nell'Alto Lazio: sono situati di preferenza tra 0 e 50 metri di altitudine, lungo e le coste e sulle pendici delle basse montagne subcostiere. I ripostigli di bronzi sono 11, situati lungo le vie di comunicazione (le cosiddette vie dei ripostigli); la più importante è quella: Albegna, valle del Fiora, Monte Amiata, che porta alla Val d'Orcia e all'Amiata. Un'altra serie di ripostigli si trova lungo la costa da Livorno a Campiglia e tutte e due indicano chiaramente percorsi tra zone minerarie. Due depositi isolati sono invece sul Monte Verruca (Pisa) e presso Lucca. Il significato di questi ripostigli è molto discusso e sono interpretati sia come depositi votivi che come riserve di materia prima [28].

Ad un momento di poco posteriore, situabile intorno alla seconda metà del II millennio a.C., tra il XVI e il XV secolo a.C. appartiene un aspetto culturale degli inizi della media età del bronzo, precedente la facies *appenninica* vera e propria diffusa lungo tutta la dorsale appenninica e caratterizzata da ceramiche riccamente decorate ad incisione e intaglio, testimoniato in Versilia, nel pisano, in Mugello, nel senese e nella Maremma. Le evidenze a nord dell'Arno, in ripari, grotte e abitati all'aperto si differenziano da quelle della Toscana centro meridionale per una maggiore somiglianza con gli ambienti dell'Italia settentrionale, ma vi sono anche connessioni con ambienti meridionali, per cui sembra che la Toscana partecipasse attivamente al vasto processo di diffusione delle culture della media età del bronzo nell'Italia centro settentrionale [22].

La civiltà appenninica è ben documentata nel senese - grossetano dove ha evidenti contatti con l'Umbria e il Lazio. Si conoscono alcuni abitati di notevole entità, quale Scarceta presso Manciano [23], con grandi capanne rettangolari, gli insediamenti all'aperto e in grotta di Belverde sul Monte Cetona e vari siti lungo tutta la costa e nelle isole. Sulle sponde dei laghi nel Lazio e in Abruzzo si affermano le palafitte,

analogamente a quanto succedeva in Italia settentrionale.

Per quanto riguarda il resto della regione la Toscana settentrionale sembra poco toccata dai grandi movimenti culturali, non solo della facies appenninica, ma anche da quelli del Bronzo recente (*subappenninico*, XIII - XII sec. a.C.), che sono invece notevolmente fiorenti nell'Italia centro meridionale, dove tra l'altro, durante tutta l'Età del bronzo media e recente, ebbero notevole importanza i contatti col mondo miceneo [22,23]. Tuttavia alcune tracce più consistenti stanno ora emergendo, oltre che nel senese, lungo la valle dell'Arno e lungo le coste ed è probabile che ricerche intensive portino all'individuazione, anche in Toscana, di numerosi stanziamenti di questo periodo. Durante il Bronzo medio si nota comunque una più consistente ricchezza dovuta ad un'economia agricolo - pastorale più evoluta e a nuovi artigianati del metallo e di altre materie prime.

Molti siti si trovano lungo i fiumi e lungo la costa: nella Toscana del Nord varie grotte nella valle del Serchio e della Versilia sono ancora frequentate e indicano passaggi dovuti alla transumanza e al pascolo stagionale, attività testimoniate anche da utensili collegabili alla lavorazione del latte, come bollitoi e mestoli. L'aspetto della civiltà appenninica è noto in queste zone della Toscana come facies di Grotta Nuova. Vari siti si trovano nella piana fiorentina e lungo tutta la valle dell'Arno [16,19].

Nel resto della regione si conoscono veri e propri insediamenti con tipologie di abitato assai diversificate: le strutture abitative sono in genere grandi capanne con muretti in pietre e alzato sorretto da pali con pareti probabilmente in frascame e pavimenti in terra battuta. Sia i villaggi che le grotte occupano luoghi compresi tra 0 e 200 metri di altitudine (con l'eccezione delle grotte del Monte Cetona tra 500 e 600 metri). Nella Toscana del Sud e nel Lazio del Nord sono più frequenti i siti su terrazzi fluviali o su alture isolate e mostrano sovente una continuità di insediamento fino al Bronzo finale e talvolta fino al periodo etrusco. I siti lungo la costa si trovano in genere in prossimità di piccoli golfi e di approdi e sono anch'essi abbastanza numerosi; anche le isole sono occupate con piccole fortezze su alture dominanti il mare.

All'Isola del Giglio sono state evidenziate strutture con buche di palo scavate nella roccia [5] e anche a Pianosa è stata trovata una grande capanna delimitata da blocchi di pietre, su uno sperone roccioso che controllava le rotte marittime tra la Corsica e la Toscana. Anche all'isola d'Elba sono siti fortificati sulle pendici del Monte Giove. Queste scelte insediamentali indicano quindi una forte organizzazione del territorio che controllava gli approdi e le rotte, probabilmente collegata agli scambi di rame e stagno con siti in posizione strategica di controllo e di difesa.

Durante il Bronzo medio si sviluppa anche il fenomeno delle grotte cultuali e si possono distinguere anche culti resi alle acque correnti di grotta, alle acque dei laghi, dei fiumi e delle sorgenti ed anche ai fenomeni di vulcanesimo secondario, questi ultimi molto frequenti soprattutto nel Lazio e lungo le dorsali appenniniche. Si tratta in genere di offerte di vasi, cereali e legumi, ma anche di oggetti di pregio in bronzo. In particolare si possono ricordare le numerose spade di bronzo rinvenute nei fiumi e nei

laghi dell'Italia centro settentrionale [8]

Nel corso del Bronzo recente e finale si assiste in modo più evidente al sorgere di centri importanti che sembrano controllare territori ben definiti: c'è, in effetti, un aumento dei siti lungo la costa da Pisa a Civitavecchia e un dato assai interessante è quello relativi a siti per la produzione del sale, come quello di Coltano presso Pisa [12], e altri che si stanno scoprendo tra Orbetello e Tarquinia.

La distribuzione degli insediamenti in rapporto all'altitudine vede una certa standardizzazione attorno ai 150-300 metri, molto spesso in posizione dominante e fortificata naturalmente, sempre in prossimità di corsi d'acqua e su terrazzi. Diviene quindi più comune la frequentazione delle alte colline e della bassa montagna, con episodi di insediamento anche a 800 metri come sulla vetta del Monte Cetona o come i «castellari» della Toscana settentrionale e della Liguria, situati su alture dominanti i passaggi delle zone montuose.

Per quanto riguarda le tipologie di abitato, una bella documentazione è offerta dal sito di Scarceta di Manciano,[25] che ha origine nel Bronzo medio (facies di Grotta Nuova): a questo periodo appartiene una capanna subrettangolare di 10x40 metri, con pavimento in terra battuta e un focolare in argilla. Nel Bronzo recente (XIII sec.a.C.) è stata costruita, su un terrazzamento delimitato da una parete di roccia e da un muro difensivo, una grande capanna ellittica di 21x10 metri, delimitata da grandi blocchi e con un grande focolare all'interno. Ad un'estremità erano moltissimi fornelli in terracotta e nel deposito sono stati trovati dolii da derrate e frammenti di ceramica micenea, indice di traffici e contatti a lunga distanza. Accanto alla capanna era una costruzione più piccola divisa in due ambienti in cui era un'officina per la forgia e la lavorazione del bronzo. Questo tipo di struttura è noto anche in villaggi coevi della Puglia e della Sicilia, in cui la lavorazione del metallo è chiaramente un'attività domestica.

Durante il Bronzo finale (XI-X sec.a.C.) a questa capanna se ne sovrappose un'altra più piccola, tripartita, con focolari tutto attorno al perimetro di quella precedente. Anche in questa era un ambiente per la lavorazione del bronzo, della faïence (pasta vitrea), del corno e dell'osso.

Alla fine del Bronzo finale il sito fu abbandonato per spostarsi a pochi chilometri di distanza nelle località di Poggio Buco e di Sorgenti della Nova [20].

Il Bronzo finale (o protovillanoviano) vede, tra l'XI e il X secolo a.C., apparire in tutta la regione vari centri importanti che controllavano territori definiti: nuovi villaggi sorgono lungo l'Arno e sulla costa, indicando ancora una volta scelte in relazione alle zone minerarie. A Pisa sono state trovate capanne circolari delimitate da buche di palo là dove il Serchio confluiva nell'Arno e forse controllava una rete di siti più piccoli lungo la costa; sicuramente c'era un rapporto col grande centro di Fossanera presso Lucca [3] dove arrivavano influenze padane della grande civiltà di Golasecca, e con i siti liguri. Va ricordata anche la palafitta di Stagno presso Livorno, vi erano inoltre centri quali Volterra che controllava la Val di Cecina [28] e Fiesole che indica l'abbandono della piana fiorentina per spostare l'abitato sulle colline. Nella Toscana meridionale, oltre al

già citato Sorgenti della Nova, abbiamo Talamone e, nel Lazio una serie di centri sui Monti della Tolfa presso Civitavecchia. Tutti questi insediamenti annunciano la nascita del protourbanesimo e molti di essi diventeranno città etrusche.

Di questo intenso popolamento si hanno testimonianze importanti nella valle del Fiora, lungo la costa e nell'interno, sia con insediamenti sia con necropoli (tombe a tumulo nella valle del Fiora e ad incinerazione a Villa del Barone a Sticciano Scalo) e con ricchi ripostigli di bronzi nel livornese e a Massa Carrara. Si può vedere una differenziazione nella tipologia degli abitati, che possono essere su alture difese naturalmente nell'Alto Lazio e costieri in Toscana, ma situati sempre lungo vie di collegamento e di controllo posti tra 0 e 150 metri, anche se non è possibile ancora per la nostra regione impostare un discorso complesso riguardante le divisioni territoriali e l'esistenza di clan gentilizi, come è stato possibile invece per il Lazio e per l'Italia meridionale. E' interessante notare la segnalazione di vari siti costieri, da Pisa al Lazio, con presenza di frammenti di grandi dolii per derrate: questo fenomeno, noto soprattutto in Italia meridionale e sulle coste adriatiche, è legato all'accumulo di risorse (olio, grano, vino e forse anche a prodotti conservati sotto sale) e alla loro redistribuzione, ciò che indicherebbe una forma, anche semplice, di organizzazione economica con divisione in classi sociali. L'esistenza di classi dominanti durante l'età del bronzo è individuabile anche in vari tipi di tombe monumentali con corredi ricchi di armi e monili. Aumenta, infatti, rispetto al Bronzo medio e recente, la circolazione di manufatti di bronzo quali spade, asce, coltelli, rasoi, spilloni, ornamenti, e di oggetti di uso domestico e di beni di prestigio quali l'ambra, le perle di faïence, ecc.

L'area di contatti culturali che si intravede per tutta l'età dei metalli pone quindi il problema dell'esistenza di una vasta rete di scambi sia a Nord che a Sud, che si evidenziano soprattutto nelle zone di confine ligure, laziale e umbro e non è escluso che anche durante l'età del bronzo una risorsa economica importante continuasse ad essere l'attività mineraria ma ci mancano, purtroppo, maggiori informazioni relative a vaste aree pressoché inesplorate, soprattutto nella Toscana interna e mancano ancora molti dati sugli insediamenti, fondamentali per una corretta ricostruzione delle culture e del loro evolversi.

Bibliografia

[1] AA. VV. *Terre e Paduli.Reperti, documenti, immagini per la storia di Coltano*, Bandecchi e Vivaldi, Pontedera 1986.

[2] AA. VV., *Le pietre degli Dei. Menhir e stele dell'Età del Rame in Valcamonica e Valtellina*, Litografica Istituto Grafico, Gorle (Bergamo) 1994.

[3] Andreotti A., Zanini A., L'insediamento di Fossa Nera di Porcari (Lucca), *Rivista di Scienze Preistoriche,* 47,1995-96, pp. 291-330.

[4] Aranguren B. M., Ducci S., Perazzi P., Il villaggio neolitico di Podere Casanuova (Pontedera, Pisa)*, Rivista di Scienze Preistoriche,* 43, 1991, pp. 155-239.

[5] Aranguren B. M., Perazzi P., Un approdo sulle rotte del Tirreno centrale: l'Isola del Giglio*,* in *Atti del IV Incontro di Studi di Preistoria e Protostoria in Etruria,* Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano 2000, pp. 129-138.

[6] Bagolini B., Grifoni Cremonesi R., Il Neolitico italiano: facies culturali e manifestazioni funerarie*, Bullettino di Paletnologia Italiana*, 85, 1994, pp. 139-170.

[7] Bietti Sestieri A.M., *Protostoria,* NIS, Roma 1996.

[8] Bernabei M., Grifoni Cremonesi R., I culti delle acque nella preistoria italiana*, Rivista di Scienze Preistoriche,* 1995-96, 47, pp.331-366.

[9] Chiarenza N., Lambertini I., Tipologie insediative nell'Eneolitico dell'Italia settentrionale e centrale, *Origini,* 28, 2007, pp.137-173.

[10] Cocchi Genick D., Grifoni Cremonesi R., (a cura di), *L'età dei metalli nella Toscana nord occidentale,* Pacini, Pisa 1985.

[11] Cocchi Genick D. - Grifoni Cremonesi R., *L'età del Rame in Toscana*, Tipografia Massarosa Offset, Massarosa 1989.

[12] Di Fraia T., Secoli L., Il sito dell'età del Bronzo di Isola di Coltano, *Preistoria e Protostoria in Etruria, Atti del V Incontro di Studi*, Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano 2002, pp. 79-93

[13] Fedeli F., Scavo di un insediamento eneolitico nel distretto minerario del Campigliese, Preistoria e Protostoria in Etruria. In *Atti del II Incontro di Studi* , II, Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano 1995, pp. 73-81.

[14] Grifoni Cremonesi R., La Toscana durante la preistoria, in «Etruria, Tuscia, Toscana: l'identità di una regione attraverso i secoli*, Biblioteca del Bollettino Storico Pisano, Collana Storica,* 40, Pacinim Pisa 1992, pp. 35-45.

[15] Grifoni Cremonesi R., Alcune osservazioni sul neolitico antico dell'areale medio tirrenico, Preistoria e Protostoria in Etruria*,* in *Atti del IV Incontro di Studi*, Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano 2000, pp. 9-15.

[16] Grifoni Cremonesi R., Telleschi T. L'Eneolitico e l'Età del Bronzo*,* in *Preistoria e Protostoria tra Valdarno e Valdera*, *Catalogo della mostra*, Bandecchi e Vivaldi, Pontedera, 2003, pp.71-79.

[17] Grifoni Cremonesi R., Tozzi C., Gli insediamenti dal Paleolitico all'età del Bronzo,

in *La Pianura di Pisa e i rilievi contermini,* a cura di M. Mazzanti, Edizioni Del Cerro, Pisa 1994, pp.153-182.

[18] Manfredini A. (a cura di), *Le dune, il lago, il mare*, Origines, ETS, Pisa 2002.

[19] Martini F., Pallecchi P., Sarti L. (a cura di), *La ceramica preistorica toscana*, Garlatti e Razzai, Firenze 1996.

[20] Negroni Catacchio N., *Sorgenti della Nova. L'abitato del Bronzo finale*, Origines, ETS, Pisa 1995.

[21] Negroni Catacchio N. (a cura di), Pastori e guerrieri nell'Etruria del IV e III millennio a.C. La civiltà di Rinaldone a 100 anni dalle prime scoperte, Preistoria e Protostoria in Etruria. In *Atti del VII Incontro di Studi*, Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano 2006.

[22] Peroni R., *La penisola italiana nell'età del Bronzo e del Ferro*, *Popoli e Civiltà dell'Italia antica*, IX, Biblioteca di Storia Patria, Tipografia Mancini, Villanova di Guidonia (Roma) 1989.

[23] Peroni R., *Introduzione alla protostoria italiana*, Laterza, Bari 1994.

[24] Pessina A., Muscio G. (a cura di), *Settemila anni fa il primo pane*, Arti Grafiche Friulane, Udine 1999.

[25] Poggiani Keller R., *Scarceta di Manciano (GR). Un centro abitativo e artigianale dell'età del Bronzo sulle rive del Fiora.* Editrice Laurum, Pitigliano (Grosseto) 1999.

[26] Sarti L., Martini F., *Costruire la memoria. Archeologia preistorica a Sesto Fiorentino*, Garlatti e Razzai, Firenze 1993.

[27] Tozzi C. e Weiss C. (a cura di), *Il primo popolamento olocenico dell'area corso-toscana*, *Interreg. II Toscana-Corsica 1997-99,* ETS, Pisa 2000.

[28] Zanini A. (a cura di) *Dal bronzo al ferro. Il II millennio a.C. nella Toscana centro occidentale,* Pacini, Pisa 1997.

Testi generali di consultazione

A.A.V.V., *Le pietre degli Dei. Menhir e stele dell'Età del Rame in Valcamonica e Valtellina*, Litografica Istituto Grafico, Gorle (Bergamo) 1994.

Bietti Sestieri A.M., *Protostoria*, NIS, Roma 1996.

Cocchi Genick D.- Grifoni Cremonesi R., *L'età del Rame in Toscana*, Tipografia Massarosa Offset, Massarosa 1989.

Fasano Guarini E., Petralia G., Pezzino P., *Storia della Toscana, 1, Dalla Preistoria all'Alto Impero Romano, Storie Regionali,* Laterza, Roma-Bari 2001.

Grifoni Cremonesi R., Revisione e studio dei materiali preistorici della Toscana, in *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie*, ser.A, 78, 1971, pp.170-300.

Guidi A., Piperno M. (a cura di), *Italia preistorica*, Laterza, Bari, 1992

Peroni R., *Introduzione alla protostoria italiana*, Laterza, Bari-Roma 1994.

Pessina A., Muscio G. (a cura di), *Settemila anni fa il primo pane*, Arti Grafiche Friulane, Udine 1999.

Sarti L., Martini F. *Costruire la memoria. Archeologia preistorica a Sesto Fiorentino*, Garlatti e Razzai, Firenze 1993.

Zanini A. (a cura di) *Dal bronzo al ferro. Il II millennio a.C. nella Toscana centro occidentale,* Pacini, Pisa 1997.

I gruppi di cacciatori raccoglitori e la preistoria olocenica nella piana fiorentina

Fabio Martini

Dipartimento di Scienze dell'Antichità «G Pasquali», Università di Firenze

Lucia Sarti

Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti – sezione di Preistoria, Università di Siena

La ricostruzione storica del più antico popolamento umano in area fiorentina, più in generale in tutto il Valdarno inferiore, si avvale ormai di informazioni numerose e puntuali[1] comprese tra il Paleolitico inferiore e l'età del Bronzo.

La piana fiorentina attraversata dall'Arno è protetta a nord dalle pendici della Calvana e di Monte Morello, che si innalzano repentinamente sino a circa m 900 sul livello del mare; sulla sponda opposta del bacino, verso sud-est, si ergono la cresta del Monte Albano e i rilievi collinari delle Cerbaie, più a meridione si apre la Val di Pesa con le colline del Chianti e ancora più sud il territorio senese. Il corso dell'Arno e dei vari affluenti mettono in comunicazione l'area fiorentina con la costa, con l'Appennino e con la Val Tiberina

Gli studi paleogeografici indicano che la piana era probabilmente occupata, durante la preistoria, da specchi lacustri alimentati da numerosi immissari, collegati al corso dell'Arno. È certo che l'impaludamento della piana fiorentina non risale alla preistoria, ma probabilmente all'Alto Medievo, anche se le prime bonifiche e le prime opere di canalizzazione sono riferibili al VII secolo a.C. e soprattutto all'epoca romana. L'ambiente ricco di acque è stato favorevole, nella preistoria olocenica, alle pratiche agricole, mentre gli spazi aperti e le colline circostanti costituivano un habitat ideale per l'allevamento e la caccia.

La presenza nei pressi degli abitati di poche essenze arbustive ed arboree, alla quale si contrappone lo sviluppo di specie ruderali, tipiche di luoghi calpestati, ossia di ambienti dove forte è il disturbo antropico, con accumulo di resti organici e inorganici, potrebbe attestare un incremento della densità demografica a partire dalla metà del IV millennio a.C. e la fine del III in cronologia calibrata. Per quanto riguarda le modalità di sfruttamento del territorio gli insediamenti preistorici della piana sono localizzati sul margine pedecollinare ad una quota intorno a m 50 sul livello del mare per i siti neolitici ed eneolitici, mentre quelli dell'età del Bronzo si sviluppano anche a quote più basse; a questi si aggiungono alcuni siti collinari risalenti sia al Paleo-Mesolitico sia alla preistoria più recente. Lungo l'intero arco della preistoria l'impianto degli abitati

non segue un canone omogeneo, ma per ogni periodo si rilevano alcune modalità costruttive più caratteristiche.

1. Le comunità paleolitiche e mesolitiche

Le tracce della presenza umana nella piana fiorentina dal Paleolitico al Neolitico non sono numerose; le testimonianze si collocano soprattutto sui rilievi collinari a nord e a sud della valle dell'Arno e dei suoi affluenti. In questo periodo le strutture sinora messe in luce nel Valdarno inferiore fiorentino sono impianti isolati, legati a soste temporanee non ripetute.

I gruppi di cacciatori-raccoglitori del Paleolitico hanno frequentato il territorio nel circuito di spostamenti legati alla caccia. Durante il Paleolitico inferiore gruppi umani hanno lasciato tracce della loro presenza sulle aree collinari circostanti il bacino dell'Arno tanto che è possibile individuare un aspetto produttivo con caratteri morfo-tecnologici indicativi di una fisionomia propria. Ci riferiamo soprattutto ai manufatti del filone acheuleano, tra cui alcuni bifacciali, rinvenuti a Monte Lepri e a Bricoli presso Scandicci, a Malmantile, Petrognano e Capraia nel Valdarno inferiore, databili probabilmente alla fase recente del filone a bifacciali. Recentemente si va definendo anche una testimonianza riferibile, con specificità locali, ad altre facies del Paleolitico inferiore, vale a dire il Clactoniano e il Tayaziano privi di bifacciali.

Durante il Paleolitico medio, con il Musteriano (100-40 mila anni fa circa), il comprensorio fiorentino vede un più intenso popolamento sui rilievi collinari dove le evidenze neandertaliane note al momento sono forse le più numerose di tutta la regione toscana. Ci riferiamo, per esempio, a Poggio Piazza Calda presso Scandicci, alle alture di Impruneta, delle Cerbaie, a Scopeti in comune di San Casciano e quelle circostanti Montelupo, come Villa Somelli e Poggio Pini.; in Mugello è noto il sito di Galliano, riferibile al Paleolitico Medio. Il carattere della produzione musteriana dell'area fiorentina può essere inserita in una sorta di provincia culturale che riguarda la Toscana, l'area ligure forse sino alla soglia della Provenza, una provincia che si differenzia da altre più o meno limitrofe (Lazio e medio versante tirrenico, Emilia Romagna-Lombardia-Veneto) per tendenze tecnologiche che paiono indicare tradizioni culturali diverse. Sul lato nord della piana è nota la stazione di Galceti, sulle alture presso Prato, probabilmente riferibile alle ultime comunità di neandertaliani .

Le documentazioni dell'ultima fase del Pleistocene, il Paleolitico superiore (40-10 mila anni fa circa), che concernono la diffusione dell'Uomo anatomicamente moderno, sono meno numerose di quelle neandertaliane; le due specie convivono nella nostra regione, sino all'estinzione del Neanderthal come testimoniano le presenze di complessi uluzziani e aurignaziani (nella penisola sino a 28.000 anni fa circa) Le industrie litiche di Turbone e di San Leonardo, nel territorio di Montelupo e di Empoli, insieme ad altri rinvenimenti sporadici documentano il passaggio di gruppi dei primi *sapiens* in Valdarno. Alle scarse evidenze gravettiane (Bilancino, nel Basso Mugello, datato attorno a 24.000 anni orsono rimane a tutt'oggi l'evidenza più significativa), fa

riscontro un buon numero di segnalazioni relative all'Epigravettiano, soprattutto nelle sue fasi finali, a riprova di un forte incremento demografico legato probabilmente alle migliori condizioni ambientali del Tardoglaciale. In questa fase finale del Pleistocene la regione toscana è inseribile in una microarea culturale che comprende l'intera zona alto-tirrenica. Nel territorio in discorso sono noti gli accampamenti di breve durata di Poggio alla Malva (18.000 anni fa circa) e di Pianali (11-10.000 anni fa), collocati quasi sulla sommità del Monte Albano, ai quali si aggiungono altri ritrovamenti sporadici lungo il Valdarno. Si tratta di piccoli bivacchi nei quali si rinvengono gli strumenti utilizzati durante le battute di caccia, mentre i resti ossei delle prede non si sono conservati.

Riteniamo che nella zona di Sesto Fiorentino, dove all'abbondanza di evidenze oloceniche fa riscontro una quasi totale assenza di complessi pleistocenici, le presenze paleolitiche fossero con probabilità localizzate sui rilievi che a nord circondano il bacino, dove le intense attività di erosione dei pendii e la conseguente distruzione dei depositi archeologici del Pleistocene potrebbero essere la causa della mancata documentazione; essi possono essersi conservati sulle colline a sud della piana grazie a diversi e meno distruttivi eventi geologici.

Le popolazioni mesolitiche, che si adattano alla trasformazione del territorio al termine dell'ultima glaciazione (da 10 mila anni fa circa), sono le prime ad insediarsi nella piana; come testimonia lo stanzaimento di Olmicino a Sesto Fiorentino; l'industria litica qui rinvenuta, per quanto scarsa, possiede quei caratteri molto standardizzati che ne permettono un inquadramento nel panorama regionale. Condizioni favorevoli a questo stanziamento sono stati senza dubbio l'ambiente umido, che offre possibilità di pesca, e i rilievi collinari circostanti favorevoli alla caccia.

Altri complessi mesolitici, più cospicui e significativi, sono noti nel Valdarno inferiore (Sammartina presso Fucecchio, ascrivibile alla *facies sauveterriana*); i gruppi umani mesolitici infatti sembrano aver frequentato il territorio sia in ambienti di pianura sia sui rilievi più alti durante le battute di caccia, come testimoniano le evidenze toscane nell'Alto Mugello, quelle sui rilievi pistoiesi e in provincia di Arezzo che affiancano i numerosi stanziamenti localizzati sull'Appennino tosco-emiliano e in Garfagnana, dove il sito di Isola Santa ha restituito una importante scansione che dimostra l'evoluzione dal locale Epigravettiano finale al Sauveterriano, mentre con Muraccio e Pian di Cerreto si assiste all'arrivo dei primi gruppi neolitici.

2. I primi agricoltori

La prima «colonizzazione» neolitica della zona avviene ad opera dei gruppi della ceramica a linee incise, così come accade per altre aree della Toscana settentrionale, mentre la corrente della ceramica impressa interessa e coinvolge la Toscana costiera e quella meridionale interna (livornese e senese) fino all'Umbria. Le linee di comunicazione di questi gruppi legati alle produzioni della ceramica a linee incise nel Valdarno sono costituite da un lato dalle valli appenniniche immediatamente alle spalle della piana,

come la valle del Rimaggio e del Marina, e dall'altro dalla valle dell'Arno che mette in comunicazione con la zona costiera del pisano e del livornese.

La risorsa primaria per i regimi alimentari delle comunità preistoriche dell'area fiorentina, dal Neolitico in poi, è costituita dall'allevamento che è stato rivolto nelle varie epoche a specie differenziate, secondo criteri di specializzazione che sono comuni alle varie culture della preistoria italiana. Nel primo Neolitico le specie più abbondanti sono quelle dei bovini (*Bos taurus*) e secondariamente degli ovicaprini (*Ovis/Capra*). Tra i pochi reperti di *Sus scrofa* si hanno sia individui selvatici che domestici; è attestata la presenza del cane domestico (*Canis familiaris*).

In una fase più avanzata del Neolitico (metà V millennio a.C. in cronologia calibrata) si radicalizza una diversa organizzazione dell'allevamento, che privilegia gli ovicaprini; in secondo rango compaiono suini e bovini, con una loro alternanza nei diversi periodi.

Questa scelta si mantiene anche nel Neolitico recente – finale e all'inizio dell'età del Rame (fine V - inizio IV millennio a. C. in cronologia calibrata); il più alto numero di *Sus* domestico in questo periodo potrebbe essere interpretabile come segno di una maggiore sedentarizzazione della comunità. Gli ovicaprini venivano macellati spesso in età giovanile, per il consumo della carne, ma la presenza di colini, l'aumento delle fusaiole e di pesi da telaio nella seconda metà del IV millennio a.C. in cronologia calibrata, potrebbe attestare anche la lavorazione dei prodotti secondari (latte e formaggi). Con l'età del Rame finale si assiste allo sviluppo dell'allevamento dei bovini e con i gruppi del Campaniforme alla diffusione del cavallo come specie domestica. La caccia appare sempre una attività secondaria di approvvigionamento del cibo; l'incidenza delle specie selvatiche non supera il 10% nel Neolitico e appare leggermente inferiore nel primo Eneolitico; le specie riconosciute indicano che l'attività venatoria si svolgeva sia nelle macchie in pianura sia sui rilievi collinari probabilmente boscosi a ridosso della piana.

Le analisi sulle ceramiche e sui manufatti in pietra rinvenuti rivelano un'approfondita conoscenza delle risorse offerte dall'ambiente anche per quanto concerne lo sfruttamento delle materie prime. La presenza in taluni impasti di diallagio, recuperabile solo tra le rocce ofiolitiche del Monte Ferrato presso Prato, mostra una specifica ricerca di questa roccia probabilmente per le sue elevate proprietà refrattarie che la rende maggiormente adatta alla produzione di ceramiche da fuoco. Selci e diaspri locali, recuperabili nei depositi alluvionali della piana, costituiscono la materia prima più numerosa utilizzata per lo strumentario in pietra. Alloctona è l'ossidiana proveniente da Lipari e da Monte Arci. Ugualmente i conglomerati e le arenarie grossolane, utilizzati insieme ai gabbri per la fabbricazione di macine, sono disponibili in loco.

Gli insediamenti neolitici più antichi, sono quelli di Mileto e di Podere della Gora 2, a Sesto Fiorentino, entrambi risalenti alla fine del VI - inizio del V millennio a.C in cronologia calibrata. La produzione ceramica di Sesto Fiorentino mostra una sua fisionomia per la varietà delle decorazioni e delle forme; presenta caratteri comuni con le produzioni della Toscana nord-occidentale e, soprattutto per la sintassi decorativa, con

la zona emiliana. Nelle zone collinari che circondano il bacino di Firenze-Prato-Pistoia attestazioni del Neolitico sono pressoché sconosciute; se si escludono rinvenimenti sporadici di manufatti litici riferibili genericamente al neo-eneolitico o rinvenimenti di superficie attribuibili al Neolitico finale effettuati a Travalle in territorio di Calenzano lungo la valle del Marina.

Durante le prime manifestazioni neolitiche sono sicuramente i contatti con l'Italia settentrionale ad essere prevalenti, non solo per gli aspetti del primo Neolitico (ceramica a linee incise), ma anche per gli aspetti riferibili alle fasi più avanzate (*facies* dei Vasi a Bocca Quadrata, intorno prima alla metà del V millennio a. C., in cronologia calibrata) come è testimoniato a Sesto Fiorentino negli insediamenti di Spazzavento e di Neto-Via Verga, area 5.. Essi mostrano, oltre ai caratteri costruttivi della struttura insediativa, una produzione ceramica confrontabile soprattutto con quelli dell'Emilia e della Liguria, riferibili ad un momento non avanzato dello sviluppo di questa cultura. L'attestazione della *facies* VBQ nella zona interna della Toscana, posta allo sbocco della valli del Bisenzio e del Marina, è indicativa del proseguire della frequentazione non occasionale di gruppi settentrionali.

La frequentazione dell'area fiorentina continua nel Neolitico recente e finale con un aspetto molto caratterizzato, come testimoniano gli orizzonti di Neto di Bolasse e di Neto-via Verga e di Scandicci. L'artigianato ceramico rimanda ad uno stile di ampia diffusione che interessa tutta la Toscana e l'Italia centrale, con contatti adriatici, richiamante produzioni della Liguria e della Francia meridionale. Questo gusto si tramanda, con alcune modificazioni importanti, anche nella fase abitativa successiva della prima età del Rame. In questo momento del Neolitico recente e finale la zona fiorentina appare inserita, come l'area centrale tirrenica in un quadro di scambi che coinvolge non solo l'Italia settentrionale, ma anche quella meridionale.

Le strutture abitative del Neolitico mostrano strutture coperte, con u impianto poco profondo, di materiali deperibili delle quali restano alcuni fori di palo e una sorta di pavimentazione costituita da piccole pietre con un battuto di terra sul quale si impostano i focolari e le fosse di scarico Già in questo periodo è ben attestata l'organizzazione spaziale degli abitati con una articolata suddivisione degli spazi funzionali e delle aree artigianali, come testimonia l'area individuata nell'insediamento di Mileto, destinata alla cottura della ceramica.

3. La prima metallurgia e il pieno Eneolitico

È con l'Eneolitico, nella seconda metà del IV millennio a.C. in cronologia calibrata che la frequentazione nella piana appare ormai capillare e con insediamenti talora ben strutturati, in qualche caso pluristraficati; contemporaneamente sui rilievi collinari i rinvenimenti si fanno scarsi o quasi assenti. .

La presenza di una precoce lavorazione del metallo nella prima metà del IV millennio a. C. sembra ben attestata nella zona dal rinvenimento di un atelier (Neto - Via Verga) con fossette ricche di concotto, tracce di combustione, alcuni oggetti finiti

in rame, scorie dello stesso metallo e crogioli per la fusione del rame. Si tratta di una fra le più antiche attestazioni di lavorazione del metallo in Italia.

Nella seconda metà del IV millennio in cronologia calibrata ormai il passaggio alla nuova società dell'età del Rame è avvenuta. La definizione della *facies* archeologica è possibile grazie al buon numero degli insediamenti rinvenuti a Sesto Fiorentino. Nella zona del Valdarno inferiore fiorentino infatti le testimonianze riferibili alla prima età dei metalli sono scarse e riconducibili a qualche ritrovamento sporadico di manufatti litici; il primo contesto al momento noto è quello di Ambrogiana (Montelupo Fiorentino) attribuibile al Bronzo antico e riferibile ad un'area funzionale di un livello abitativo.

Il rinvenimento più consistente in Valdarno inferiore è quello della tomba a fossa di Montespertoli, a S. Quirico in Collina per la quale è difficile dare un inquadramento cronologico sicuro; in effetti altre testimonianze funerarie di epoca eneolitica sono documentate nella Val d'Elsa, mentre rare lo sono nel territorio fiorentino si ricorda il tumulo funerario di Via Bruschi relativo al Campaniforme. Più a sud nel senese come è noto si conoscono altre testimonianze funerarie e rinvenimenti di ripostigli.; inoltre è segnalato un orizzonte campaniforme a Poggio la Croce a Radda in Chianti e un contesto del Bronzo medio e recente a Gaggiano presso Poggibonsi In Mugello la frequentazione sembra riferirsi al Bronzo Medio (XVII-XVI sec. a. C.) con l'insediamento di Dicomano e al Bronzo recente (XIII-XII sec. a. C.) con quello di Poggio Castellonchio.

Nell'età del Rame la zona fiorentina sembra mantenere i contatti con la zona tirrenica centro-meridionale e con l'area adriatica già avviati nel momento finale del Neolitico, mentre paiono diminuire gli influssi dall'ambiente settentrionale. La zona fiorentina sembra svolgere in questo momento un ruolo attivo di tramite e di zona di rielaborazione di elementi in senso lato meridionali; provenienti non solo dalla Toscana meridionale e dal Lazio, ma anche dall'Abruzzo e dalla Campania, influenze che, nel loro percorso, sembrano talora varcare anche l'Appennino.

Nella seconda metà del IV millennio a. C. (in cronologia calibrata) la Toscana e il territorio intorno a Firenze in particolare appaiono fortemente connessi all'espansione del Campaniforme, una cultura cosmopolita, diffusa in gran parte d'Europa, innovativa nei regimi economici, nei modelli costruttivi, nelle produzioni artigianali e negli aspetti funerari. Il fenomeno culturale del Campaniforme) ha avuto nell'area fiorentina una fioritura particolare, che ha al momento scarsi confronti, per densità di ritrovamenti, in altre regioni italiane. In questo periodo infatti la frequentazione del territorio sembra subire un forte incremento demografico con molti insediamenti (circa quindici) che si collocano lungo la fascia pedecollinare con uno sviluppo di circa 500 anni. L'inserimento della zona fiorentina in un circuito culturale europeo è dimostrata non solo dalla produzione materiale, ma anche da alcune manifestazioni cultuali come la sepoltura di bovino di Semitella e la struttura funeraria a tumulo di Via Bruschi già citata.

Le modalità costruttive dell'età del Rame, come accennato, mantengono nelle linee generali il carattere registrato durante il Neolitico Caratteristico della zona fiorentina

in coincidenza con la presenza della facies campaniforme e del primo Bronzo antico è l'utilizzo di avvallamenti naturali (paleoalvei torrentizi), che talvolta vengono adattati con tagli ripidi degli argini naturali o allargamenti (Querciola, Semitella, Lastruccia).

4. L'età del Bronzo

La capacità del Campaniforme di radicarsi nel territorio vede la sua permanenza anche durante la prima età del Bronzo, sino ad un suo momento avanzato, con un gusto nella produzione ceramica legato alla tradizione, anche se si notano mutamenti e trasformazioni significative. Il legame con il Campaniforme precedentesi osserva inoltre nei modelli insediativi e forse nei regimi economici.

Durante tutta l'età del Bronzo la pianura fiorentina sembra essere stata densamente popolata; gli insediamenti sono meno numerosi rispetto al periodo eneolitico, ma più estesi e quasi sempre plurifase; alcuni sono posizionati nei pressi o in continuità stratigrafica di alcuni abitati più antichi dell'età del Rame. Di conseguenza è oggi possibile proporre un quadro dello sviluppo dei complessi culturali nel territorio fiorentino nei secoli di passaggio tra il III e la metà del II millennio a. C. in cronologia calibrata.

La media età del Bronzo, intorno alla metà del II millennio, è documentata in una serie di abitati che mostrano uno sfruttamento diversificato del territorio fiorentino. Alcuni continuano ad essere sempre ubicati nella piana (Petrosa, Frilli C, Dogaia, Termine Est 2), anche al di sotto della quota altimetrica di m 40 s.l.m. Altri abitati (Filettole e Cava Rossa di Figline, presso Prato, sono i più significativi, ma anche a Stabbia e Caprona nel Valdarno inferiore) sono impostati sui rilievi circostanti le zone pianeggianti e sulle pendici del Monte Ferrato, a quote comprese tra m 140-400 s.l.m. L'uso non esclusivo della piana costituisce un fatto nuovo; la risalita sui rilievi potrebbe essere legata a fattori ambientali, quali un inizio di trasformazione del bacino da lacustre a palustre, ma questa ipotesi non trova al momento valide e certe attestazioni. Non si può escludere che tale strategia insediativa sia legata a necessità di impianti maggiormente difesi e protetti, come avviene in questo stesso periodo anche in altre zone della penisola.

Dall'inizio del Bronzo medio (XVII-XVI sec. a. C.) si ritorna a strategie abitative più semplici, anche con aree abitative localizzate direttamente sul terreno di base senza interventi costruttivi importanti come si nota a Sesto Fiorentino(Petrosa, Val di Rose, Frilli C). Più elaborato appare l'abitato del Bronzo finale di Cilea, localizzato su un piccolo rialzato morfologico a fianco di un corso d'acqua, delimitato su un lato da una probabile recinzione, della quale rimane, ben conservata, la base costituita da uno stretto cordolo (larghezza m 0,50) di pietre e ciottoli disposti in più ordini sovrapposti, a luoghi ben strutturato a guisa di muretto.

In generale, nelle produzioni ceramiche si notano nel territorio fiorentino cambiamenti significativi con il momento avanzato del Bronzo antico e ancor più con il passaggio al Bronzo medio; i rapporti culturali sembrano di nuovo intensificarsi sia

con le aree transappenniniche (introduzione di modelli più propriamente «poladiani» e in minor misura «terramaricoli») e con alcune zone della Toscana meridionale, soprattutto con il senese. Gli artigianati ceramici del Bronzo medio si collegano alle *facies* dell'Italia centrale (*facies* Grotta Nuova in senso lato. Alla fine della media età del Bronzo sembra di notare una persistenza, forse una intensificazione, dei rapporti con l'ambiente settentrionale, mentre gli elementi ricollegabili più direttamente alla Toscana meridionale e all'alto Lazio sembrano diminuire.

Nel territorio fiorentino un sito di riferimento per il Bronzo finale è l'insediamento di Cilea e nella Val di Pesa quello di Bibbiani. La produzione ceramica di questi due insediamenti, che si collocano cronologicamente in un momento maturo e finale del periodo in discorso, rientra nel repertorio noto in Italia centrale. Relativamente abbondante continua ad essere in questo periodo la produzione metallurgica, iniziata nell'età del Rame, significativa è anche la presenza di manufatti in materia dura animale e oggetti di ornamento in pasta vitrea.

Non si può al momento appurare se la scarsità di attestazioni insediative in area fiorentina a partire dal Bronzo recente sia collegabile ad una reale minore frequentazione del territorio come sembra proponibile per altre zone della Toscana settentrionale oppure solo ad una carenza delle ricerche. Certo è che i siti di Bibbiani, collocato su una leggera altura alla confluenza tra i fiumi Arno e Pesa, e di Cilea, posto a bassa quota ai piedi di Monte Morello che sovrasta la piana fiorentina e la valle dell'Arno, sembrano bene inserirsi nelle modalità insediative frequenti nel Bronzo finale con abitati impiantati a controllo delle vie fluviali. Si può osservare in particolare, che ambedue i siti si collocano in una posizione strategica lungo direttrici di comunicazione con i centri padani, ricevendo apporti dalla Toscana meridionale, a conferma di dinamiche già note in epoche precedenti.

5. L'età del Ferro

Anche per la facies villanoviana le ricerche nella piana fiorentina stanno fornendo informazioni nuove, sia di tipo abitativo che funerario, ancora in gran parte inedite. Per le strutture abitative si tratta di aree più o meno infossate senza strutture evidenti e di una serie di sottostrutture con materiale di scarico collocabili cronologicamente tra la fine dell'VIII e gli inizi del VII secolo. Le strutture funerarie consistono in nuclei di tombe «a pozzetto» e altre in fossa con inumati.

Queste testimonianze confermano la continuità insediativa della piana fiorentina dall'epoca preistorica fino a quella etrusca, in particolare tra il tardo Villanoviano e le più antiche fasi dell'Orientalizzante; esula da questo contributo trattare dell'organizzazione territoriale a partire dal Bronzo finale e delle dinamiche che hanno portato alla nascita dei primi centri urbani.

NOTE

[1] Le ricerche hanno preso l'avvio con le ricognizioni sistematiche nel Valdarno inferiore nei primi anni '70, affiancate da alcuni scavi stratigrafici sul Monte Albano, sulla Calvana e in Mugello; dal 1982 scavi pressoché continui si svolgono a seguito dell'espansione edilizia nel territorio di Sesto Fiorentino.

BIBLIOGRAFIA

Si indicano i principali testi per la zona fiorentina; a questi si fa riferimento anche per la bibliografia precedente e per lavori più generali.

Fenu P., a cura di, *Echi della Preistoria,* Firenze 2005.

Martini F., a cura di, *Preistoria del Valdarno inferiore fiorentino,* Quaderni del Museo della Ceramica e del Territorio di Montelupo F.no, 1, Empoli 1984.

Martini F., Poggesi G., Sarti L., a cura di, *Lunga memoria della piana. L'area fiorentina dalla preistoria alla romanizzazione,* Guida della mostra, 2 P Ed., Firenze 1999.

Sarti L., Martini F., 1993, *Costruire la memoria. Archeologia preistorica a Sesto Fiorentino (1982-1992*), Garlatti e Razzai, Firenze 1993.

Sarti L., Martini F., *Insediamenti e artigianati dell'età del Bronzo in area fiorentina. Le ricerche archeologiche nei cantieri CONSIAG (1996-98*), Collana «Millenni», Ed. 2P, Firenze 2000.

Storia di pi greco

Alessandra Del Piccolo

Istituto Magistrale Statale 'Domenico Berti', Torino

1. Un curioso anniversario

Una volta all'anno il calendario ci offre lo spunto per passare una giornata in compagnia di uno dei più noti e, nello stesso tempo, misteriosi e affascinanti numeri apparsi nell'universo matematico, quel ϖ che sin dalle scuole elementari ci si abitua a chiamare 3,14 permettendoci, così, di far uscire dall'anonimato il 14 marzo, ovvero il 3/14 se usiamo la notazione anglosassone.

Scopo di questo intervento è una rilettura dell'evoluzione storica del calcolo e del significato del numero ϖ attraverso gli snodi concettuali e le variazioni di approccio al problema che possano avere risvolti interessanti da un punto di vista didattico.

2. Quando qualcuno si accorse che…

Ben prima dell'invenzione della ruota l'uomo doveva aver imparato a riconoscere il contorno estremamente regolare di un cerchio: lo poteva riconoscere nelle pupille dei suoi compagni e in quelle di alcuni animali, lo poteva scorgere nelle corolle di alcuni fiori, lo poteva ammirare ogni giorno nel disco del Sole e, nelle notti più belle, in quello della Luna.

Di sicuro non potremo mai sapere chi fu il primo ad accorgersi che, pur tracciando con un bastoncino cerchi diversi nella sabbia, i loro diametri e le rispettive circonferenze mantenevano un rapporto costante tra loro. Quel che sappiamo è che il simbolo ϖ venne usato per denotare il valore costante di questo rapporto solo a partire dal XVIII secolo (d. C. ovviamente!) e che le doppie lineette sovrapposte come simbolo di uguaglianza entrarono nell'uso corrente dalla seconda metà del 1500, per cui la formalizzazione del problema nei termini a noi tutti familiari, ovvero

$$\pi = \frac{C}{d}$$

dove C è la lunghezza della circonferenza e d la lunghezza del rispettivo diametro – *indipendentemente* da quale cerchio si consideri – è conquista tutto sommato recente.

3. Come misurare ϖ nelle sabbie del Nilo

Non c'è alcuna prova diretta che gli Egizi si siano effettivamente accorti della costanza del rapporto tra circonferenza e diametro né che abbiano tentato di calcolarne il valore. Di certo essi furono interessati a trovare il rapporto tra il cerchio e il quadrato, come si

può leggere sul noto Papiro Rhind (reperto risalente al 1650 a. C. circa, ora conservato al British Museum di Londra) su cui lo scriba Ahmes scrisse:

> Togli 1/9 a un diametro e costruisci un quadrato sulla parte che ne rimane; questo quadrato ha la stessa area del cerchio.

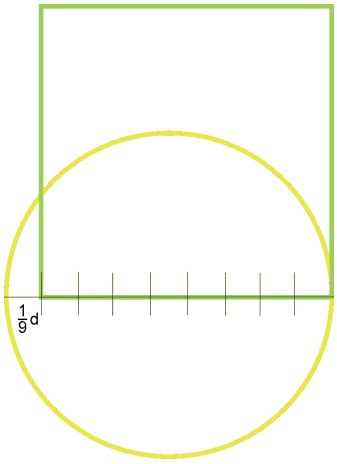


Figura 1 - La quadratura del cerchio secondo le indicazioni dello scriba Ahmes

Sapendo che l'area del cerchio è pari a $\varpi\ r^2$ e che quest'area deve essere uguale a quella di un quadrato di lato 8/9, il testo di Ahmes permette di ricavare

$$\pi \quad 4\cdot\left(\frac{8}{9}\right)^2 \quad 3{,}16049\ldots$$

con un errore inferiore all'1% su quello oggi noto[1].

4. Cerchi e quadrati equivalenti

Le indicazioni lasciate sul Papiro Rhind si possono considerare come il primo tentativo di «quadrare il cerchio», ovvero di trovare un quadrato di area equivalente a quella di un cerchio dato.

Il problema della *quadratura del cerchio*, intimamente connesso con ϖ, appassionò i matematici antichi fin dal suo primo apparire in quella che fu la civiltà che, più di ogni altre, contribuì a definire i contorni della matematica come luogo privilegiato di esplorazione di idee e di significati: la civiltà greca. In essa, infatti, la matematica assunse da subito carattere originale rispetto alle tradizioni precedenti o contemporanee: non si trattò più di adattare la scienza dei numeri a esigenze pratiche di agrimensura o di costruzione di edifici, quanto piuttosto di esplorare questioni puramente teoriche che iniziarono a far apprezzare la sottile distinzione che intercorre tra l'accuratezza di un'approssimazione e l'esattezza di un concetto.

Sembra che si debba ad Ippocrate il primo trattato di geometria della storia matematica, scritto più di un secolo prima dei celeberrimi *Elementi* di Euclide, ma nessun frammento dell'opera è giunto fino a noi. Proprio nell'opera euclidea vennero formalizzate le due regole che, da quel momento in poi, consentirono di discriminare

tra soluzioni «canoniche» e soluzioni «illegittime» di un problema geometrico:

- la costruzione delle figure deve avvenire tramite l'utilizzo esclusivo di riga e compasso;
- deve essere possibile effettuarla attraverso un numero finito di passi.

Purtroppo questi limiti resero impossibile il problema della quadratura del cerchio (come anche quello della duplicazione del cubo o della trisezione dell'angolo, gli altri due problemi 'classici' dell'antichità), ma ci vollero 2300 anni perché qualcuno riuscisse a dimostrarne l'impossibilità[2]! Avremo modo di ritornare sull'argomento.

5. Il genio di Archimede

Dobbiamo a Democrito di Abdera (460-370 a. C.) il tentativo di analizzare le proprietà dei solidi non considerandoli nella loro interezza ma come somma di infinite sezioni. Nello stesso periodo altri due matematici, Antifonte e Brisone di Eraclea, proposero di trovare l'area del cerchio attraverso le aree di poligoni regolari inscritti e circoscritti ad un cerchio, utilizzando un nuovo metodo che venne formalizzato da Eudosso di Cnido (409-356 a. C. circa) quasi un secolo dopo: il *metodo di esaustione*.

Una nuova strada era stata aperta e il primo che la percorse con successo per il calcolo di ϖ fu Archimede di Siracusa (287-212 a. C. circa).

A differenza di Antifonte e di Brisone, egli non considerò più le aree dei poligoni inscritti e circoscritti, bensì i loro perimetri, trovando così un'approssimazione della circonferenza del cerchio. Partendo dall'esagono regolare inscritto,

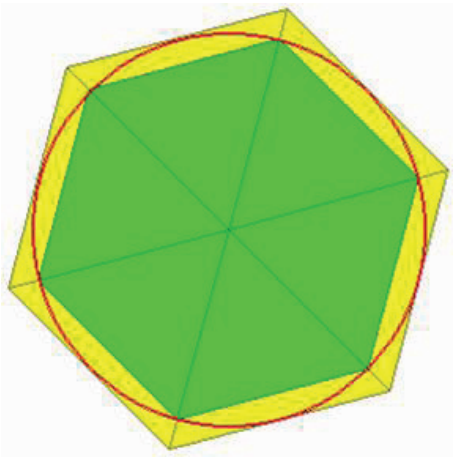


Figura 2 - L'esagono inscritto e l'esagono circoscritto ad una circonferenza: punto di partenza per la procedura archimedea

Archimede calcolò i perimetri dei poligoni ottenuti raddoppiando successivamente il numero dei lati fino a raggiungerne 96. Il procedimento iterativo si ricollega a quello che viene talvolta chiamato *algoritmo archimedeo*:

- si sviluppa la serie P_n, $p_{n,}$ P_{2n}, p_{2n}, P_{4n}, p_{4n}, …, dove P_n e p_n sono i perimetri dei poligoni regolari di *n* lati circoscritti e inscritti alla circonferenza data;

- a partire dal terzo termine, si calcola il successivo in base ai due termini precedenti alternando le loro medie armonica e geometrica, ovvero

$$P_{2n} = \frac{2 \cdot p_n \cdot P_n}{(p_n + P_n)} \quad \text{e} \quad p_{2n} = \sqrt{p_n \cdot P_{2n}}.$$

Il metodo usato da Archimede per calcolare le radici quadrate, per trovare il perimetro dell'esagono circoscritto e per calcolare le medie geometriche, era simile a quello usato dai babilonesi, ma il risultato a cui perveniva era di gran lunga migliore di tutti quelli determinati fino a quel momento.

Egli pubblicò i suoi lavori nel libro *Sulla misurazione del cerchio*, dove si legge:

> La circonferenza di ogni cerchio è tripla del diametro, più una parte minore di un settimo del diametro e maggiore di dieci settantunesimi.

Quindi

$$3 + 1/7 < \pi < 3 + 10/71.$$

Se si fa una media tra i due valori si ottiene 3,1419, con un errore di meno dei tre decimillesimi sul valore reale!

La grandezza di Archimede consiste proprio nell'aver proposto per primo un metodo che permettesse di scegliere il grado di precisione da attribuire al risultato del calcolo, sfruttando quindi al meglio l'intuizione di Eudosso e la successiva formalizzazione di Euclide.

Concetti come «arbitrariamente vicino a» oppure «prossimo quanto si vuole» vengono utilizzati con estremo rigore e maestria: siamo di fronte ad una delle tante manifestazioni di un'abilità di calcolo straordinaria del matematico siracusano, ancor più evidente se si pensa che egli non poteva disporre né di un simbolo per lo zero né di alcuna sorta di notazione decimale: il pensiero occidentale venne a conoscenza di tali strumenti matematici solo a partire dal Basso Medioevo attraverso contatti con pensatori indiani e arabi e grazie all'opera di matematici del calibro del Fibonacci.

6. Uno sguardo al di fuori dell'Europa

Mentre in tutta Europa governi in guerra e lotte religiose soffocarono l'istruzione, la ricerca e il libero flusso delle informazioni, grandi progressi scientifici furono compiuti dal II all'VIII secolo d. C. in Cina e in India, già sedi di prestigiose comunità matematiche nei secoli precedenti. Ricordiamoci che qui l'uso dello zero e della notazione decimale erano già pratica corrente tra i matematici e questo costituiva un duplice indubbio vantaggio.

Quasi 650 anni dopo Antifonte e Brisone, in Cina, il matematico Liu Hui riscoprì lo stesso metodo e iniziò i calcoli, usando prima un poligono di 192 lati poi di 3072 lati.

Nel V secolo, il grande astronomo Tsu Ch'ung-chih e suo figlio Tsu Keng-chih, partendo da un esagono e raddoppiandone i lati undici volte, arrivarono a calcolare il

perimetro di un poligono di 24.576 lati, ottenendo:

$$\pi = \frac{355}{113}$$

Il valore differisce da quello oggi accettato solo a partire dall'ottava cifra decimale: nessuno avrebbe trovato un valore più preciso per oltre mille anni.

Il più grande matematico indiano del VII secolo, Brahmagupta, pensò invece di poter individuare una regolarità in grado di svelare il vero rapporto tra circonferenza e diametro. Innanzitutto calcolò i perimetri dei poligoni inscritti di 12, 24, 48 e 96 lati, ottenendo rispettivamente i valori $\sqrt{9,65}$, $\sqrt{9,81}$, $\sqrt{9,86}$, $\sqrt{9,87}$.

Poi, armato di questa informazione, Brahmagupta fece un salto di fede supponendo che, aumentando il numero dei lati e avvicinando sempre di più i poligoni alla circonferenza, i loro perimetri – e quindi ϖ – si sarebbero sempre più avvicinati a $\sqrt{10}$. Era, ovviamente, del tutto in errore, ma questo fu il valore che poi si diffuse dall'India all'Europa e che fu usato nel Medioevo dai matematici di tutto il mondo forse anche per l'estrema facilità con cui si poteva ricordare e trasmettere.

7. Il Rinascimento europeo

Si deve aspettare la fine del Cinquecento per assistere a un nuovo e significativo passo in avanti sulla strada del calcolo di ϖ, questa volta a opera di un giurista e matematico dilettante francese, François Viète (1540-1603).

Da un punto di vista concettuale, il suo fu un contributo rivoluzionario, benché prendesse le mosse ancora una volta dal metodo archimedeo dei poligoni inscritti e circoscritti: per la prima volta ϖ veniva espresso tramite un prodotto di infiniti termini ottenuto tramite semplici considerazioni geometriche e con l'ausilio della *trigonometria*, uno strumento matematico sostanzialmente nuovo. Esso, infatti, fu riscoperto in pieno Rinascimento da astronomi quali Copernico e Keplero - che se ne servirono per compilare mappe del cielo accuratissime – dopo una prima apparizione presso gli astronomi dell'Età alessandrina quali Eratostene di Cirene (276 - 194 a. C. circa), Aristarco di Samo (310 - 230 a. C. circa) e successivamente Tolomeo di Alessandria, le cui osservazioni si possono datare tra il 127 e il 151 d. C.

La procedura utilizzata da Viète metteva in relazione l'area di un poligono regolare inscritto a n lati con quella di un poligono di $2n$ lati.

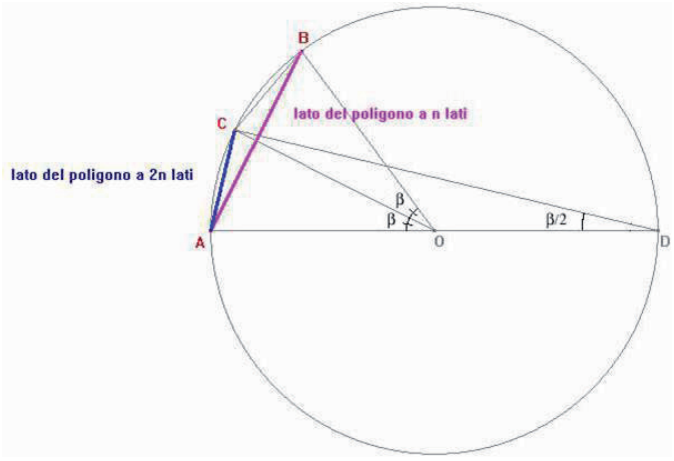


Figura 3 - Approccio trigonometrico della procedura di Viète: lati e angoli in relazione

Osservando la figura è facile riconoscere che l'area del primo poligono è:

$$A(n) = n \cdot \text{area}(AOB) =$$

$$\frac{1}{2} n \cdot r^2 \cdot \sin 2\beta =$$

$$= n \cdot r^2 \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta$$

Analogamente l'area del secondo poligono si può esprimere come

$$A(2n) = n \cdot r^2 \cdot \sin\beta .$$

Facendo il rapporto tra le due aree si ottiene

$$\frac{A(n)}{A(2n)} = \cos\beta .$$

Dimezzando nuovamente i lati del poligono, si ha

$$\frac{A(n)}{A(4n)} = \frac{A(n)}{A(2n)} \times \frac{A(2n)}{A(2^2 n)} = \cos\beta \cdot \cos\frac{\beta}{2} ;$$

al *k*-esimo dimezzamento si giunge alla seguente uguaglianza:

$$\frac{A(n)}{A(2^k n)} = \frac{A(n)}{A(2n)} \times \frac{A(2n)}{A(2^2 n)} \times \ldots \times \frac{A(2^{k-1} n)}{A(2^k n)} = \cos\beta \cdot \cos\frac{\beta}{2} \cdot \ldots \cdot \cos\frac{\beta}{2^k} .$$

Se *k* diventa infinitamente grande l'area del poligono risulta indistinguibile da quella del cerchio, cioè:

$$\lim_{k \to \infty} A(2^k n) = \pi r^2$$

per cui

$$\pi = \frac{\frac{1}{2} n \cdot \sin 2\beta}{\cos\beta \cdot \cos\frac{\beta}{2} \cdot \cos\frac{\beta}{2^2} \cdot \cos\frac{\beta}{2^3} \cdot \ldots}.$$

Viète scelse un quadrato per cominciare, cosicché $n = 4$, $\beta = 45°$, $\cos\beta = \sin\beta = \sqrt{\frac{1}{2}}$.

Inoltre poteva utilizzare la formula di bisezione $\cos\frac{\beta}{2} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos\beta}$ ottenendo infine:

$$\frac{2}{\pi} = \sqrt{\frac{1}{2}} \times \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{2}}} \times \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{2}}}} \times \cdots$$

Quest'ultima espressione fu pubblicata da Viète nel 1593 nel suo *Variorum de rebus mathematicis responsorum liber VIII*: essa rappresenta una pietra miliare nella storia di ϖ ed è anche il punto più alto raggiunto dal rinascimento matematico in questo ambito.

Purtroppo, Viète stesso si rese conto che la formula, malgrado la sua indubbia eleganza, risultava poco efficace quando si trattava di calcolare effettivamente il valore di ϖ. Viète riuscì a determinare le prime dieci cifre decimali utilizzando poligoni di 393.216 lati (a partire da $n = 6$ e considerando $k = 16$): era la misura più accurata ottenuta fino a quel momento[3].

8. Efficienza, innanzitutto

All'inizio del Seicento il calcolo di ϖ assunse i contorni di una prova di tenacia e di resistenza: il metodo di esaustione era stato spremuto a più non posso e la strategia stava perdendo di attrattiva anche perché richiedeva costi enormi - vite intere spese in mezzo a calcoli laboriosi – a dispetto di benefici poco consistenti – qualche decina di cifre decimali.

I tempi erano però maturi per far germogliare nuove idee; come se non bastasse, nel giro di duecento anni si avvicendarono sulla scena alcuni dei matematici più affascinanti e acuti del II millennio. Per la matematica fu un periodo di straordinaria vitalità, un'ideale staffetta in cui ognuno preparò il terreno al proprio successore.

Nel 1655, infatti,apparve – non senza scatenare polemiche - *l'Arithmetica infinitorum* di John Wallis (1617-1703) in cui si abbandonò qualsiasi considerazione geometrica e si propose, al posto, un *approccio completamente aritmetico*. I calcoli, pur sempre notevoli, risultarono semplificati e portarono a stabilire una delle formule più eleganti fino a quel momento apparse per il calcolo di ϖ, ovvero:

$$\frac{\pi}{2} = \frac{2\cdot 2\cdot 4\cdot 4\cdot 6\cdot 6\cdot \ldots}{1\cdot 3\cdot 3\cdot 5\cdot 5\cdot 7\cdot \ldots}$$

Come già quella di Viète, la formula di Wallis esprime ϖ mediante un prodotto infinito in cui, però, tutti i fattori sono numeri naturali. Essa consente un'approssimazione mediante un lento avvicinamento al suo valore limite in una continua oscillazione tra un termine maggiore di ϖ e il successivo minore di ϖ.

9. Gli sviluppi … in serie!

Verso la fine del Seicento si assistette ad un ulteriore passo avanti grazie allo scozzese James Gregory, scomparso a soli trentasei anni nel 1675. Egli trovò una soluzione estremamente elegante del calcolo della arcotangenti che si rivelò feconda di implicazioni per il calcolo di ϖ. In una lettera del 15 febbraio 1671 Gregory menzionò la *serie*:

$$arctgx = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} = x - \frac{x^3}{3} - \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \ldots$$

Si può facilmente ottenere una formula di approssimazione per ϖ se solo si considera $x = 1$, ovvero *arctg* (1). Infatti, l'arco la cui tangente è pari a 1 vale 45° e in radianti:

$$\frac{\pi}{4} = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \ldots$$

Purtroppo, di Gregory non ci è rimasto nessuno scritto che provi un suo tentativo in questa direzione. Qualche anno più tardi, però, fu Leibniz a riscoprire sia la serie sia il suo caso particolare rendendo pubblici i suoi risultati nel 1682. Per questo la serie è nota come *serie di Gregory-Leibniz*.

Nel giro di poco tempo la ricerca delle cifre decimali di ϖ fece un brusco salto in avanti scatenando una sorta di competizione tra i matematici di fine Seicento: l'obiettivo era quello di calcolare sempre più cifre e ciò stimolò la ricerca di formule di approssimazione sempre più efficaci tali, cioè, da convergere con la massima rapidità[4].

Chi più di tutti fu fecondo di risultati su ogni branca della matematica fino ad allora conosciuta fu il matematico svizzero Leonhard Euler (1707-1783) – it. Eulero. La sua opera monumentale, frutto di una vita di studi condotti anche quando ormai aveva perso la vista da entrambi gli occhi, nacque da una produzione annuale media di ottocento pagine, tanto che ci è rimasta una bibliografia di 886 titoli nonché migliaia di lettere testimoni di una corrispondenza fittissima con i più famosi matematici del tempo.

Il suo contributo per il calcolo di ϖ fu notevolissimo. Ecco alcune delle formule che riuscì a scoprire, tutte più efficaci[5] di quella di Gregory:

$$\frac{\pi}{4} = 5 \cdot arctg\left(\frac{1}{7}\right) - 2 \cdot arctg\left(\frac{3}{79}\right)$$

$$\frac{\pi}{4} = 2 \cdot arctg\left(\frac{1}{3}\right) + arctg\left(\frac{1}{7}\right)$$

$$\frac{\pi^2}{6} = \frac{2^2}{(2^2-1)} \times \frac{3^2}{(3^2-1)} \times \frac{5^2}{(5^2-1)} \times \frac{7^2}{(7^2-1)} \times \frac{11^2}{(11^2-1)} \times \dots$$

$$arctgx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^{2n}(n!)^2}{(2n+1)!} \times \frac{x^{2n+1}}{(1+x^2)^{n+1}}$$

$$\frac{\pi}{2} = \frac{3}{2} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{6} \times \frac{11}{10} \times \frac{13}{14} \times \frac{17}{18} \times \frac{19}{18} \times \frac{23}{22} \times \dots$$

$$\frac{\pi^2}{6} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$$

$$\frac{\pi^4}{90} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4}$$

$$1 \quad \sin x = \left(1 - \frac{2x}{\pi}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{2x}{3\pi}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{2x}{5\pi}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{2x}{7\pi}\right)^2 \cdot \dots$$

$$\frac{\pi^3}{32} = \frac{1}{1^3} - \frac{1}{3^3} + \frac{1}{5^3} - \frac{1}{7^3} + \frac{1}{9^3} - \dots$$

Inoltre, fu proprio *grazie a lui* che si diffuse l'uso di utilizzare il simbolo ϖ per denotare il rapporto tra la circonferenza e il suo diametro; ancora nel 1734 utilizzava la lettera *p* ma già nel 1736, negli articoli e nella sua corrispondenza privata, iniziò ad usare regolarmente ϖ per denotare il rapporto tra la circonferenza e il suo diametro. Il suo esempio fu contagioso e alla fine del secolo quasi tutti i matematici europei avevano adottato la stessa simbologia.

Da quel momento si scatenò una vera e propria caccia ai decimali che durò per tutto il secolo seguente e che culminò nelle 707 cifre decimali calcolate da William Shanks nel 1873.

10. Un ago per catturare ϖ

Nel 1777 George Louis Leclerc, conte di Buffon (1707-1788) propose, risolvendolo, un curioso problema che fece intervenire ϖ in un contesto originale aprendo così la strada per una nuova branca della *teoria della probabilità*, fino a quel momento confinata all'interno della teoria dei giochi.

Buffon suppose di considerare una vasta area piana sulla quale erano state tracciate linee rette parallele a distanza *d* una dall'altra; immaginava, poi, di gettare a caso su di essa un sottile ago di lunghezza $L < d$. Le cose che potevano accadere erano due: o l'ago incontrava una delle linee oppure cadeva tra una linea e l'altra. Qual era la probabilità che l'ago intersecasse una delle linee?

Assumiamo che «a caso» significhi che ogni orientazione dell'ago e ogni posizione del suo centro siano due variabili indipendenti e equiprobabili; sia φ l'angolo che

permetta di individuare l'orientazione dell'ago rispetto alle rette disegnate e sia x la distanza del centro dalla retta più vicina. Come risulta evidente dalla figura,

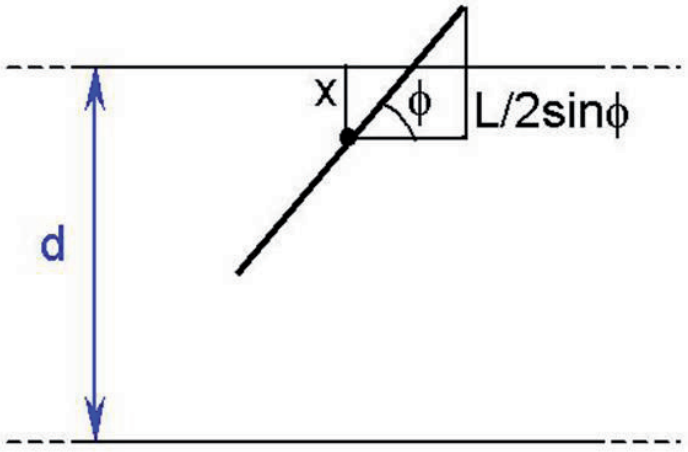


Figura 4 - I limiti geometrici del problema dell'ago di Buffon.

la condizione affinché l'ago incontri una retta sarà:

$$x < \frac{L}{2}\sin\varphi ,$$

per cui il problema è risolto se si determina la probabilità

$$P\left(x < \frac{L}{2}\sin\varphi \right).$$

A tal fine Buffon propose un approccio geometrico, trasformando la definizione classica di probabilità – rapporto tra il numero di casi favorevoli e il numero di quelli possibili – in un rapporto tra aree opportunamente individuate.

I limiti geometrici insiti nel problema sono $0 < x < \frac{d}{2}$ e $0 < \varphi < \pi$; utilizzando un grafico (φ; x) questi permettono di individuare un rettangolo la cui area, pensata come insieme di punti, rappresenta la somma di tutte le possibili combinazioni tra l'orientazione dell'ago e la posizione del suo centro sul piano. Le combinazioni favorevoli, invece, sono individuate dai punti le cui coordinate soddisfano la condizione sopra determinata, ovvero tutti quei punti che si trovano al di sotto della curva $x = \frac{L}{2}\sin\varphi$.
.

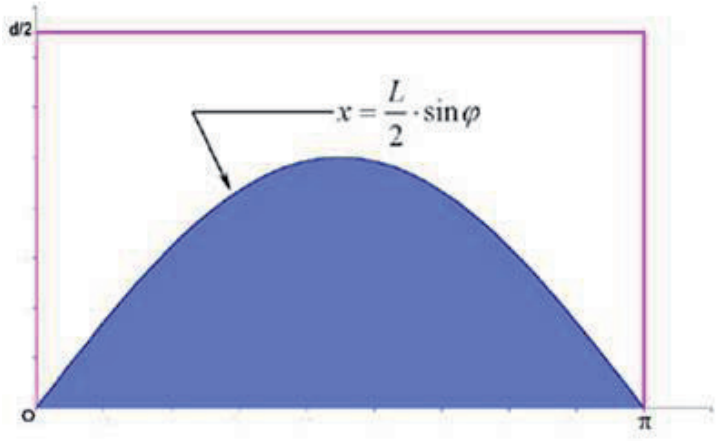


Figura 5 - Interpretazione geometrica della probabilità classica attraverso un confronto tra aree.

Detto questo, risulta evidente che

$$P\left(x < \frac{L}{2}\sin\varphi\right) = \frac{\text{casi favorevoli}}{\text{casi possibili}} = \frac{\text{area azzurra}}{\text{area del rettangolo}} = \frac{\frac{L}{2}\cdot\int_0^{\pi}\sin\varphi\cdot d\varphi}{\pi\cdot\frac{d}{2}},$$

ovvero:

$$P = \frac{2L}{\pi d},$$

o meglio:

$$\pi = \frac{2L}{dP}.$$

Buffon stesso tentò una verifica sperimentale del suo risultato lanciando[6] più volte un ago su una superficie rigata, ma il problema e la sua soluzione furono persi di vista finché Pierre Simone Laplace (1749-1827) – uno dei più grandi matematici francesi di tutti i tempi – non se ne occupò, proponendone anche una generalizzazione (rigando la superficie con linee tra loro perpendicolari) e gettando le basi per quello che oggi è noto come *metodo MonteCarlo.*

Usando la terminologia moderna, si può descrivere il metodo come l'insieme di tutte quelle procedure di calcolo che, utilizzando sequenze di numeri casuali (numeri random) consentono, ad esempio,

- il calcolo di quantità
- la simulazione di fenomeni.

Con l'avvento dei calcolatori il metodo svelò le sue enormi potenzialità e la sua straordinaria efficacia, visto che divenne possibile generare e manipolare grandi quantità di dati in tempi brevi.

11. La natura di ϖ

Dopo migliaia di anni spesi nell'affannosa corsa alla determinazione dei decimali di ϖ, con la segreta speranza di trovare una formula che permettesse di «imbrigliare» definitivamente un cavallo troppo bizzoso, era tempo di fermarsi a riflettere: qual era la vera natura di quel numero le cui cifre decimali sembravano sfuggire a qualsiasi regolarità?

Già da secoli i matematici erano convinti di trovarsi di fronte ad un numero irrazionale, ma la dimostrazione conclusiva arrivò solo nel 1761 grazie a Johann Heinrich Lambert (1728-1777). Il suo ragionamento si basava sul fatto che, se x è un numero razionale diverso da zero, tan x deve essere irrazionale e viceversa, cosa da lui dimostrata in precedenza. Ma allora, visto che $\tan\frac{\pi}{4} - 1 \in \mathbb{Q}$, segue che $\frac{\pi}{4}$ non può essere razionale, e così pure ϖ.

Nel 1794 anche Adrien-Marie Legendre giunse alla stessa conclusione per altra via e provò anche l'irrazionalità di ϖ^2. Vent'anni prima, Euler aveva però suggerito che ϖ fosse un numero trascendente e anche Legendre coltivò la stessa convinzione. Nei suoi *Éléments de géométrie* del 1794 si legge:

> E' probabile che il numero ϖ non sia neppure contenuto nelle irrazionalità algebriche, ossia che non possa essere una radice di un'equazione algebrica con un numero finito di termini, i cui coefficienti siano razionali. Pare però molto difficile dimostrarlo in modo rigoroso.

Fu Joseph Liouville (1809-1882) a dimostrare l'esistenza di tal categoria di numeri, che furono chiamati trascendenti. Il primo esemplare di tal insieme fu trovato da Charles Hermite nel 1873: era il numero e, e tal scoperta non fece che infiammare nuovamente le discussioni sulla natura di ϖ.

Finalmente, nel 1882, Ferdinand von Lindemann (1852-1939) riuscì ad arrivare a capo dell'enigma, sfruttando una delle più belle e significative equazioni di tutta la matematica che Euler aveva reso famosa. Dapprima, infatti, egli mostrò che l'equazione $e^{ix} + 1 = 0$ non poteva avere soluzioni algebriche; poi utilizzò il risultato che già Euler aveva trovato, ossia

$$e^{i\pi} - 1 = 0,$$

il che dimostrava che ϖ non poteva essere algebrico.

Questo straordinario risultato mise la parola «fine» al problema della quadratura del cerchio: era impossibile trovare il quadrato equivalente ad un cerchio dato tramite le regole classiche.

12. Una sfida senza fine

Come abbiamo già avuto modo di dire, l'Ottocento si chiuse con un record: W. Shanks era riuscito a calcolare 707 decimali, migliorando un suo precedente primato di 607 cifre.

Nel 1945 D. F. Ferguson si accorse che il calcolo di Shanks conteneva un errore alla posizione 527: era il frutto di un anno di lavoro con carta e penna, al ritmo medio di

poco più di una cifra al giorno! Fortunatamente, da lì a un paio d'anni, Ferguson potè servirsi di una delle prime calcolatrici da tavolo e nel settembre del 1947 determinò 808 cifre.

Per i matematici era la fine dell'incubo degli interminabili calcoli a mano: con un calcolatore a disposizione, la tentazione di andare oltre ogni limite prese sempre più consistenza. Così, nel 1948 Smith e Wrench arrivarono alla millesima cifra; l'anno dopo entrò in funzione l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*) e con questo mastodonte dal peso di tonnellate ci vollero solo settanta ore per calcolare 2037 cifre di ϖ.

Con l'avvento del computer elettronico gli attacchi a ϖ si fecero ancora più pressanti. Già nel 1954, utilizzando il NORC (*Naval Ordinance Research Calculator*), ci vollero solo tredici minuti per calcolare 3089 cifre; tre anni dopo, il Paris Data Processing Center, con l'ausilio di un IBM 704, calcolò in soli quaranta secondi le 707 cifre che Ferguson aveva determinato in un anno. Fu solo più questione di velocità di computo della macchina e di affidabilità della stessa e ϖ divenne sempre di più il banco di prova ideale per testare rapidità e precisione di ogni nuovo calcolatore. L'incremento di cifre seguì ritmi esponenziali: il primo milione nel 1973; 16 milioni nel 1983; un miliardo nel 1989; 6 miliardi nel 1995; 51,5 miliardi nel 1997 in poco più di 29 ore. Tra settembre e dicembre del 2002, dopo circa 600 ore di lavoro con un HITACHI SR8000/MP, si giunse a $1{,}2411\times10^{12}$ cifre: numeri che fanno girare la testa!

Parecchi i protagonisti di questa corsa anche se, fra tutti, spiccano nomi come quelli del giapponese Yasumasa Kanada e dei russi David e Gregory Chudnovsky, due fratelli che, pur di esplorare a piacimento i meandri di ϖ, si sono costruiti con le loro mani un supercomputer con pezzi comprati d'occasione.

Sembra che, a tutt'oggi, le cose stiano in questi termini: determinare un numero sempre maggiore di cifre decimali non ha alcuna utilità pratica se non quella di mettere alla prova i calcolatori, tanto che Philip J. Davis ha scritto:

> il misterioso e mirabile ϖ è ridotto a un gargarismo che aiuta i computer a schiarirsi la voce.

Rimane, però, la segreta speranza che una migliore conoscenza della natura di ϖ possa risultare utile alla comprensione della geometria, della matematica e di tutti quei fenomeni fisici in cui il numero interviene in maniera sorprendente.

NOTE

[1] Malgrado la notevole precisione del risultato, il valore ebbe poca diffusione e mille anni dopo Babilonesi e Ebrei continuavano a usare per ϖ il valore 3. Nell'Antico Testamento, I Re, 7: 23, così viene descritto l'altare costruito per il tempio di Salomone: «Poi si fece il mare fuso: dieci cubiti da una sponda all'altra,cioè completamente rotondo; la sua altezza era di cinque cubiti e una corda di trenta cubiti lo circondava all'intorno».

[2] Ancora oggi, a dire il vero, i cosiddetti ciclometristi (gli appassionati della misurazione del cerchio) sono ostinatamente convinti – per quanto la cosa possa risultare incredibile – di aver trovato la soluzione del rompicapo e cercano di far proseliti professando, con fanatica passione, la loro 'verità'.

[3] Qualche anno dopo, nel 1610, moriva a Leida Ludolph von Ceulen, un matematico che spese quasi tutta la sua vita a calcolare i decimali di ϖ, utilizzando poligoni che avevano più di 32 miliardi di lati ciascuno! Alla fine di un lavoro meticoloso ed estenuante arrivò a calcolarne 35. In suo onore, in Germania, ϖ prese il nome di *numero ludolfiano*.

[4] Anche Newton, durante il suo cosiddetto *annus mirabilis* trascorso a Woolsthorpe per sfuggire alla peste di Londra del 1655, passò molte ore assorbito dal problema tanto che ebbe a scrivere successivamente: «mi vergogno a dirle quante cifre calcolai, non avendo altro da fare a quel tempo».

[5] Euler riusciva a calcolare 20 decimali in una sola ora!

[6] Nel 1901 il matematico Lazzerini riuscì a valutare ϖ tramite 34.080 lanci. La curiosità consiste nel risultato a cui giunse, cioè $\pi = \frac{355}{113}$, proprio lo stesso valore di Tsu Ch'ung Chi.

BIBLIOGRAFIA

[1] Beckmann P., *A History of Pi*, St Martin's Press, New York 1976.
[2] Blatner D., *The Joy of Pi*, Walker, New York 1997.
[3] Boyer C. B., *Storia della matematica*, Oscar Saggi Mondatori, Milano 1990.

Galileo e Liceti, ovvero genio e mediocrità

Mariapiera Marenzana

già Docente di Lettere presso l'Accademia Nazionale di Danza, Roma

1. Fortunio Liceti

Fortunio Liceti, chi era costui? Era, proprio come il Carneade di manzoniana memoria, un filosofo aristotelico, il quale tuttavia, a differenza dell'antico Carneade, ebbe la ventura di essere contemporaneo di Galileo e suo corrispondente. A questo egli deve, assai più che alla vasta cultura libresca e alla iperprolifica attività di scrittore, l'aver consegnato il suo nome alla storia. Emerge infatti, dalla trentennale corrispondenza tra i due, oltre al ritratto a tutto tondo di due personalità tanto diverse, un quadro vivace dei rapporti conflittuali e drammatici fra la cultura tradizionale fondata su «un mondo di carta» e quella nuova, basata sull'esperimento e sul dubbio. C'è inoltre molto Liceti ritratto nel Simplicio del *Dialogo*, e anche nel più rispettabile Simplicio dei *Discorsi*, ed è da una polemica con Liceti che ha origine l'ultima opera scientifica di Galileo.

Sullo sfondo dell'epistolario sono le vicende biografiche dei due corrispondenti, i principali allievi dello scienziato pisano, le dispute accademiche, i contatti culturali in Italia e in Europa, l'ombra minacciosa dell'Inquisizione, la peste, ma anche aspetti minuti della vita quotidiana del '600.

Liceti deve il suo nome, Fortunio, alla nascita prematura e avventurosa avvenuta, nel 1577, su una nave sbattuta da una tempesta nel tratto di mare fra Recco e Rapallo; il padre, medico, avrebbe assicurato la sopravvivenza del bimbo ponendolo in una scatola tenuta in caldo. Il fortunoso ingresso nel mondo, e i racconti che certamente gliene vennero fatti, influirono senza dubbio sul gusto per il meraviglioso e l'insolito che avrebbe caratterizzato la vita di Liceti. Il quale, dopo aver studiato filosofia e medicina a Bologna, insegna filosofia a Pisa e, dal 1609, allo Studio di Padova.

È qui che avviene l'incontro con Galileo il quale, tuttavia, ormai reso famoso dalle scoperte astronomiche, sta per ritornare a Firenze. È forse Cesare Cremonini, illustre docente aristotelico di filosofia naturale e buon amico di Galileo, più volte indagato dall'Inquisizione perché sospetto di eresia e di ateismo – accuse in cui nel 1604 si trova coinvolto lo stesso Galileo – a favorire l'incontro tra i due. Certo è che, nel breve periodo della loro frequentazione, nasce tra Galileo e Liceti una sorta di familiarità, una specie di amicizia destinata a protrarsi nel tempo.

2. Le prime lettere

È infatti a lui che Galileo, rientrato a Firenze, chiede di consegnare ora un messaggio, ora del denaro a Marina Gamba, la donna con cui ha convissuto e che gli ha dato tre

figli, da lui lasciata a Padova. Nella sua risposta, dell'ottobre del 1610,[1] Liceti, con riferimento ai satelliti di Giove scoperti da Galileo, si dice certo che: *«Le sue osservazioni saranno dal tempo fatte note a ciascuno»* e gli fa sapere che *«in Alemagna il Cheplero col suo stromento haveva veduto intorno a Giove le stelle medicee»*. Lamenta che a Bologna il matematico Magini *«non confessi di haver veduti li pianeti nuovi, o più tosto affermi di non haverli veduti con tutto che habbia adoprato l'occhiale»*. Nella missiva seguente si rallegra *«che le sue osservazioni siano confermate dal testimonio delli padri Giesuiti in Roma»*, ma aggiunge: *«quanto più novità divolgherà, tanto meno verosimile dimostrerà ciò che pretende; ma io spero che il tempo chiarirà il tutto, sendo queste cose nelle quali altrui non debba fermamente asseverare cos'alcuna, se molte volte e per molto tempo non ha osservato la loro natura e conditioni»*.

Gran parte di Liceti è già contenuta in queste sue prime lettere: ammirazione per Galileo, interesse per le sue scoperte, fiducia dichiarata nel metodo dell'osservazione. In realtà, a ben guardare, dietro al consiglio di non divulgare troppe novità perché rischiano di risultare inverosimili, e dietro l'osservazione sul lungo tempo occorrente per verificare e assimilare il nuovo, si nascondono i suoi personali dubbi, che nascono non da valide argomentazioni, ma piuttosto dalla paura di staccarsi dal sapere tradizionalmente accolto.

Sono atteggiamenti che Galileo ben conosce, per averli osservati ormai più volte nei suoi interlocutori, e che gli fanno valutare appieno tutte le difficoltà che dovrà incontrare nel suo sforzo di far penetrare la nuova cultura nel polveroso mondo accademico, tra coloro che intendono difendere privilegi acquisiti e posizioni di comodo, ma anche tra altri che, come Liceti, pur favorevolmente disposti, faticano ad abbandonare le «inveterate abitudini di pensiero». Atteggiamenti che Galileo può comprendere, per aver ricevuto egli stesso un'educazione formale di stampo aristotelico, per aver egli stesso insegnato il sistema tolemaico ed essersi esposto in favore delle idee nuove con un certo ritardo, non da ascrivere forse solo a ragioni di prudenza o al rispetto dovuto ai programmi stabiliti dallo studio patavino. Certo, Galileo ha avuto in suo padre Vincenzo un maestro che gli ha insegnato a spezzare i vincoli della tradizione e a fidarsi delle verifiche sperimentali. Ma non può non aver avvertito, anche in sè, lo scarto che esiste tra un'audace acquisizione intellettuale e la sua assimilazione emotiva e psicologica, essendo ben consapevole della portata rivoluzionaria delle sue osservazioni celesti. È questa percezione che lo rende fiducioso di poter a lungo andare convincere i suoi avversari, sicuro com'è, a questo punto del suo percorso, che la ragione nella sua limpida evidenza debba alla fine prevalere.

3. Percorsi diversi

Gli anni che seguono vedono un diradarsi della corrispondenza tra i due, i quali percorrono cammini diversi, ma ugualmente operosi. Liceti scrive, rigorosamente in lingua latina e in più volumi, sui più svariati argomenti, cui fornisce spiegazioni di stampo aristotelico: la nascita spontanea degli animali inferiori; le lampade eterne

rinvenute in antichi siti archeologici; i calligrammi; l'anima nelle bestie; le comete (*«una scrittura… tanto indecente e brutta, c'ha stomacato tutti i letterati che l'hanno letta»*, nel giudizio del matematico Camillo Gloriosi).

Nei due libri del *De monstruorum natura, causis et differentiis*, del 1634, forse la sua opera più nota, si occupa di anomalie genetiche e dà dei «mostri» una interpretazione che si discosta da quella tradizionale, che li voleva segni punitivi dell'ira divina. Mostruosa è per Liceti la creatura rara degna di *riverenza* e che suscita stupefazione - una donna bellissima piuttosto che una deforme - il che non gli impedisce di illustrare la sua opera con esempi fantastici di esseri mezzo uomo e mezza donna, di donne con orecchie sulle spalle e occhi sulla schiena, di individui con testa di animale, come nelle migliori favole, nel solco di una tradizione medioevale priva di basi scientifiche, e secondo il gusto tipico del '600 del collezionismo e della «maraviglia». Salvo che in Liceti si colgono qua e là, segni di un disagio

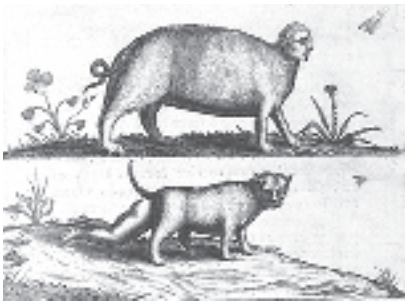


Figura 1 - Illustrazione dal De monstruorum natura di Liceti.



Figura 2 - Un'altra illustrazione dal De monstruorum natura di Liceti.

che come contemporaneo di Galileo non poteva non avvertire, lo sforzo di fornire spiegazioni per i fenomeni descritti, e la ricerca di un qualche rigore sperimentalistico e di testimonianze attendibili a sostegno delle sue affermazioni. Testimoni che poi però va a cercare in Aristotele, Mosè, ed altri personaggi di peso, a conferma della sua scomoda posizione di uomo a cavallo di due mondi, attratto dal nuovo, ma incapace di comprenderlo e di sceglierlo.

Valga per tutti un solo esempio del suo modo di intendere e fare scienza: l'uovo contenente una testa umana con barba e capelli fatti di serpenti, che sarebbe stato trovato in Borgogna nel 1569, e il cui disegno compare nell'opera di Liceti. Il filosofo non solo dà per

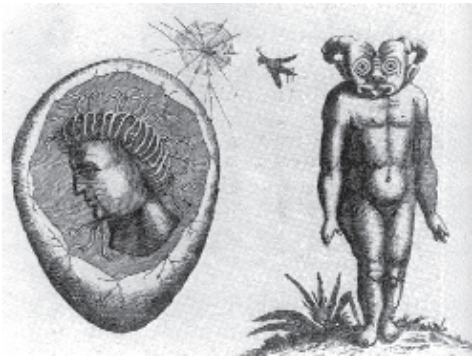


Figura 3 - L'uovo di Borgogna.

scontata l'effettiva esistenza dell'oggetto in questione, ma di esso arriva a proporre tre a suo avviso ugualmente plausibili spiegazioni. La prima: il seme di un uomo accoppiatosi con una gallina si è fatto veleno generando i serpenti. La seconda: la gallina è stata fecondata dal gallo dopo aver beccato uova di serpe e sangue mestruale. L'ultima: la gallina si è accoppiata con un serpente dopo aver ingerito sangue mestruale. Si capisce pertanto come sia difficile condividere l'opinione di chi oggi vorrebbe far risalire la nascita della moderna teratologia al *De monstruorum natura*, data l'assoluta mancanza di metodo scientifico che caratterizza il libro. Il quale, peraltro, godette di molta fortuna, a testimonianza della persistente incapacità del mondo accademico, contemporaneo e anche posteriore a Galileo, di percepirlo come un fossile culturale.

In quegli stessi anni in cui Liceti conduce un'operosa ma tranquilla e rispettata vita di studioso, Galileo elabora le strategie per la diffusione del nuovo sapere e per convincere la Chiesa ad accettare il sistema copernicano: impresa difficile e rischiosa, in cui speranze e delusioni si alternano. E scrive. Nel *Sidereus Nuncius*, del 1610, comunica le scoperte astronomiche fatte con il cannocchiale. Nel 1616 è esortato dal Cardinale Bellarmino ad abbandonare come eretica la teoria copernicana ma, divenuto papa nel 1623 Urbano VIII Barberini, suo grande estimatore, pubblica *Il Saggiatore,* e nel 1632 il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*.

4. Liceti, alias Simplicio

In una lettera da Padova del 1632, Liceti ringrazia Galileo per avergli inviato il suo *Dialogo*:

> nel quale io spero di trovare molte acutezze del suo peregrino intelletto et d'imparare molte sottigliezze di filosofia […] De' contradditori ch'ella fusse per avere, ella ha ragione di non temere, perché, se saranno autori celebri, doveranno, con essolei modestamente disputando, faticarsi per trovare la luce del vero, da tante e così dense tenebre di false opinioni coperte; se saranno di poco nome, si potrà lei gloriare di aver loro data occasione di farsi chiari col concorrer seco nel filosofare.

Sono parole che rivelano tutti i limiti di Liceti. Nel libro rivoluzionario che tratta dei due massimi sistemi del mondo, egli andrà alla ricerca di «acutezze» e «sottigliezze»

con cui gloriarsi in dispute future, intese non tanto come strumenti di apprendimento, quanto come palestre di retorica e di promozione mondana per 'autori celebri' e per altri 'di poco nome' che mirano a 'farsi chiari' più che a ricercare senza pregiudizi il vero.

Il sussiego e il colore della cultura elitaria del '600, che si avvertono in queste parole, così come il tono suadente, e la stessa struttura della frase non possono non farci pensare al Simplicio del *Dialogo*. Risulta evidente che Galileo, nella costruzione del suo vivace personaggio, non ha in mente un astratto modello di filosofo peripatetico, ma esercita la sua «veramente maravigliosa osservazione del costume»,[2] delineando i tratti salienti, fisici e psicologici, di individui reali da lui frequentati, quali il Liceti, appunto, ma anche il Cremonini, il Magini, il Rocco e altri più o meno illustri filosofi accademici, con il loro gergo, la vasta cultura libresca, le paure, la boria, i tic, le timidezze, i rifiuti, e soprattutto la fideistica difesa di Aristotele nelle cui parole ogni scibile è già contenuto. E ammirabile è l'abilità con cui egli riesce a sintetizzare in una figura tanto artisticamente vitale l'intera cultura di un'epoca al tramonto. Ma come non pensare a Liceti anche per altre figue che compaiono nel *Dialogo*, quali il filosofo che, dopo aver assistito alla dissezione di un cadavere confessa che, non fosse per Aristotele il quale asserisce il contrario, dovrebbe ammettere che i nervi si dipartono dal cervello e non dal cuore?

5. Parentesi di silenzio

Non abbiamo alcuno scambio epistolare tra Galileo e Liceti negli anni che vanno dal 1632 al 1636. In questo intervallo di tempo il primo, nel 1633, subisce la condanna per eresia da parte dell'Inquisizione, è costretto all'abiura, e il suo *Dialogo* è posto all'Indice. Il papa ordina che copia della sentenza e dell'abiura siano inviate ai nunzi apostolici e agli Inquisitori e diffuse capillarmente in tutta Europa (la minacciosa esibizione di potere desta inquietudine ovunque e lo stesso Cartesio professa cautela).

Nel dicembre 1633 l'Inquisitore di Padova informa Roma che *«dal S.r Liceti, filosofo primario, gli è stato dato un libro del suddetto Galileo, mandatogli da lui»*. Si tratta del *Dialogo*, di cui il prudente Liceti, benché di certo non sospettabile di simpatie copernicane, ritiene opportuno sbarazzarsi al più presto.

In quello stesso dicembre è concesso a Galileo di tornare a casa, ma dovrà vivere confinato ad Arcetri e potrà ricevere solo visite sottoposte all'approvazione dell'Inquisitore. Gli è ribadito il divieto di parlare con chicchessia degli argomenti incriminati.

Ma è un momento di sollievo per lo scienziato, che dopo tante traversie può rivedere gli amici e i figli, e che spera vivamente nella grazia. Inoltre la peste, che tanti lutti ha causato a Firenze appare estinta. L'elenco dei morti e dei contagiati non scandisce più le giornate, il «mal cattivo» contro il quale ogni misura umana e divina si era rivelata inutile (le ricette a base di aloe, così come la grande processione per le vie della città con la statua della Madonna, dopo la quale c'era stata una severa recrudescenza) si è spontaneamente esaurito; i palazzi e la fortezza di S. Miniato, adibiti a lazzaretti, e i luoghi destinati a quarantena sono restituiti agli antichi usi; le donne e i bambini

sopravissuti, a lungo tenuti in casa per decreto del magistrato preposto alla salute, possono finalmente uscire per le strade, e la gente rifluisce in città. Ma lo scienziato ha il dolore di perdere nel 1634 la figlia amatissima Virginia, suor Maria Celeste, che di tanto conforto gli è sempre stata.

Sono anni di intenso lavoro, nei quali Galileo si dedica alla sua opera scientifica più importante, i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*[3], in cui getta le fondamenta della moderna scienza del moto e della struttura dei materiali. Pubblicato in Olanda nel 1638, il libro costituisce una sostanziale conferma del sistema copernicano, mai peraltro menzionato.

Liceti continua a insegnare a Padova, e a scrivere libri in più volumi sui più disparati argomenti, mitologia, analogia, origine del moto nell'universo – a confutazione delle idee del *Dialogo*!

6. Ripresa dei contatti

Non sappiamo quali motivi inducano Liceti a lasciare Padova. Certo è che nel 1637 egli chiede a Galileo una raccomandazione del Granduca per poter tornare a Bologna, e dal 1637 occupa una cattedra presso quella Università, dove trova come collega Bonaventura Cavalieri, discepolo di Galileo, grande matematico e precursore del calcolo infinitesimale. Nello stesso anno pubblica due nuovi libri, sull'anima e sulla natura.

È improbabile che Galileo abbia dedicato tempo a queste letture. Sull'immortalità dell'anima, infatti, Liceti aveva già scritto, e il giudizio dello scienziato sul metodo con cui il filosofo aveva affrontato il tema si trova chiaramente espresso nella seconda Giornata del *Dialogo*, là dove Salviati dice:[4]

> non è gran tempo che avendo un filosofo di gran nome [Liceti] composto un libro dell'anima, in riferir l'opinione di Aristotele circa l'esser o non esser immortale, adduceva molti testi … che piegavano al senso pernizioso [cioè alla sua mortalità], e venendo avvisato che egli avrebbe avute delle difficultà nel farlo licenziare, riscrisse all'amico che … non aveva difficultà niuna circa il mutare la dottrina d'Aristotele, e con altre esposizioni e con altri testi sostener l'opinione contraria, pur conforme alla mente d'Aristotele.

Quanto al tema stesso, il giudizio di Galileo è implicito in queste sue parole altrove espresse: «*Il tentar l'essenza l'ho per impresa non meno impossibile e per fatica non men vana nelle prossime sustanze elementari che nelle remotissime e celesti*»,[5] vale a dire: tempo perso discutere di argomenti che sono oltre le nostre attuali capacità di indagine e di verifica sperimentale.

7. Una drammatica ostinazione

È nella sua ostinazione a volersi aggrappare all'*ipse dixit* tutto il dramma di Liceti e di quelli che, come lui, nutrono interessi nel campo della conoscenza, ma si trovano a vivere impreparati in un'epoca che richiede un coraggio intellettuale di cui non sono capaci. I rimasticatori del sapere antico sono essenzialmente dei pavidi che, aggrappati alla consolante idea della centralità dell'uomo, non sanno cogliere nelle

loro implicazioni le sconvolgenti novità che le osservazioni di Galileo propongono, e le interpretano piuttosto come curiosità che vanno a impreziosire una galleria di superstizioni, mitologia e pregiudizi. Sfugge inoltre loro che il metodo galileiano non ammette incoerenze e, ancor peggio, essi si servono del dubbio, cardine di quel metodo, per porre in discussione l'evidenza sperimentale ove contraddica l'autorità della tradizione.

8. Simplicio e la nuova strategia

A tanta distanza di tempo è difficile per noi, oggi, valutare appieno il disorientamento di molti contemporanei di Galileo, spesso suoi interlocutori volonterosi, e questo ci porta a leggere il personaggio di Simplicio nel *Dialogo* come una figura più comica, forse, di quanto non fosse nelle intenzioni dello scienziato, e a trascurarne i risvolti patetici o a volte addirittura drammatici. Una corretta prospettiva storica permette inoltre di capire la trasformazione che Simplicio subisce nel passare dal *Dialogo* ai *Discorsi*.

Non sono solo ragioni di prudenza quelle che inducono Galileo a modificare il personaggio in cui il papa Urbano VIII si era sentito ritratto, nella direzione di farne un interlocutore più rispettabile, anche a costo di renderlo artisticamente più scialbo. Gli anni e le sconfitte subite hanno reso Galileo meno fiducioso che l'evidenza della ragione debba imporsi al pregiudizio; ha sperimentato ormai troppe volte, e dolorosamente, quello che Salviati nel *Dialogo* aveva osservato[6]:

> mi sono accertato esser tra gli uomini alcuni i quali […] prima si stabiliscono nel cervello la conclusione, e quella… sì fissamente s'imprimono, che del tutto è impossibile l'eradicarla giammai; ed a quelle ragioni che a lor medesimi sovvengono o che da altri sentono addurre in confermazione dello stabilito concetto, per semplici o insulse che elle siano, prestano subito assenso ed applauso, ed all'incontro, quelle che lor vengono opposte in contrario, quantunque ingegnose e concludenti, non pur ricevono con nausea, ma con isdegno ed ira acerbissima.

Come anni prima aveva indicato alla Chiesa il modo di conciliare Bibbia e Copernico, Galileo getta ora il ponte tra l'antico sapere e quello nuovo, che di nuovi strumenti si serve. L' approcccio per veicolare il metodo e la scienza si fa più pacato e prudente, fondato non più sulla contrapposizione dei sistemi, ma sulla condivisione di una base culturale comune. Ecco allora l'uso del latino in alcune pagine dei *Discorsi*, ecco Simplicio, spogliato di ogni traccia di comicità, trattare quasi alla pari con Salviati e Sagredo e affermare, sulla base del «consiglio» di Platone, la supremazia sulla logica dello strumento matematico. Questo volonteroso Simplicio, proiettato in avanti quasi a indicare la strada a quegli aristotelici che vogliano tentare il nuovo, è la personificazione della speranza di Galileo. Purtroppo ben presto Simplicio/Liceti naufragherà proprio sugli scogli della matematica e ciò segnerà, come vedremo, la fine di questa utopia galileiana.

Lo scambio di lettere con Liceti rispecchia il mutato atteggiamento dello scienziato, il quale sembra ora prestare più attenzione a idee dell'avversario che avrebbe una volta

bruscamente rigettate, e ribadisce più volte il suo essere autenticamente aristotelico. Occorre assecondare l'interlocutore, per non rischiare incomprensione e rifiuto. Il destinatario servirà comunque da cassa di risonanza per altri che, tramite suo, potranno essere raggiunti e forse convinti.

9. La pietra lucifera di Bologna

È il 1639 e Liceti sta scrivendo, tra altri, un nuovo libro, il *Litheosphorus seu de lapide bononiensis*, su una pietra (solfuro di bario) trovata nei pressi di Bologna - e già nota a Galileo - che sembra capace di assorbire la luce e di restituirla. L'ingiustificata e fantasiosa estensione, da parte di Liceti, delle proprietà della pietra alla Luna dà ben presto l'avvio ad un'aspra polemica con Galileo, e alla stesura, da parte di questi, della sua ultima opera di carattere scientifico. Nel suo libro Liceti parla infatti della luce cinerea, cioè di quella leggera luminosità che permette di intravvedere la parte oscura del nostro satellite, quando esso ha forma di falce. A questa luminosità Galileo aveva già accennato nel *Sidereus Nuncius* e poi nella prima Giornata del *Dialogo,* sostenendovi, nelle parole di Sagredo, che essa *«viene dal reflesso del lume del Sole nella superficie della terra e del mare: e più si vede tal lume chiaro, quanto la falce è più sottile, perché allora maggiore è la parte luminosa della Terra che dalla Luna è veduta… e tanto più potente la reflession del lume*». Spiegazione semplice, esauriente e corretta.

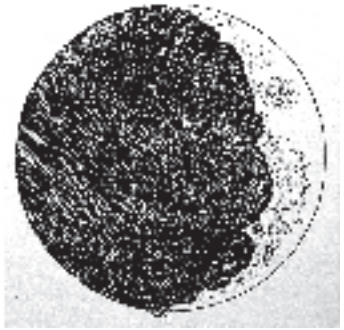


Figura 4 - Falce lunare nel disegno di Galileo (da Sidereus Nuncius).

Liceti sostiene invece che «il candore lunare» è dovuto alla illuminazione da parte del Sole dell'ambiente che circonda la Luna, e ritiene anche che, a somiglianza della pietra lucifera bolognese, la Luna sia capace di trattenere per qualche tempo e poi diffondere la luce solare. È la sua ostinazione a voler credere il nostro satellite un corpo celeste diverso dalla Terra, unita al suo gusto per il meraviglioso, a indurlo a pensare la Luna avvolta dalla sua atmosfera come un'enorme pietra lucifera, la quale ripete nel cielo grandiosamente, e in eterno, il piccolo prodigio dei sassolini di Bologna da lui tante volte osservato nel buio di una stanza.

Galileo non ha ancora visto il libro, ma gli amici lo informano che nel capitolo 50 del *Litheosphorus* Liceti gli ha attribuito parole che, citate a sproposito e fuori contesto, travisano completamente il suo pensiero. Durissimi i loro giudizi (basti per tutti Dino Peri: *«io sono scandalizzatissimo, stomacatissimo, come di persona ignorantissima, furba e*

maligna…»); il filosofo, concordano, non merita neppure l'onore di una risposta. Ma Galileo, è «restato stordito» e addolorato che Liceti abbia tradito «l'amicizia di molti anni passata», pretende delle scuse e intende difendersi. Pur cieco, vecchio e malato, e consapevole che la sua condizione di prigioniero dell'Inquisizione lo pone in svantaggio, decide di buttarsi nella mischia. Liceti si gloria della corrispondenza con lui, mostra le sue lettere ad altri e le inserisce nelle proprie opere: sarà il cavallo di Troia della nuova scienza, la cassa di risonanza nel mondo accademico della voce di Galileo.

La decisione è capita e condivisa dagli amici, che attendono con ansia la sua risposta perché: «*i frutti, e massime le novellizie di V. S. Ecc.ma, son cosa troppo ghiotta, troppo singolare, troppo divina per rinunciarvi*» (Dino Peri).

10. Un lusinghiero invito

Nel marzo del 1640 Galileo riceve dal principe Leopoldo de' Medici un lusinghiero invito a esporre la «*sua opinione intorno al secondario lume della luna*». Figlio di Cosimo II, Leopoldo è un fine cultore delle scienze, fondatore dell'Accademia del Cimento e grande estimatore dello scienziato. Galileo accoglie volentieri l'invito: la sua risposta a Liceti sarà nella forma di una lettera al Principe Leopoldo. La scrive in pochi giorni e ne invia copie ad amici, in Italia e oltralpe, ma non a Liceti. Leopoldo, assecondando il desiderio dello scienziato, la fa leggere «*ai dottori dello Studio di Pisa, tra cui alcuni Peripatetici* – dai quali, assicura – *fu lodata in estremo*».

Tanto è l'entusiasmo per il nuovo scritto di Galileo, quanto spietate le critiche a Liceti. (Cavalieri: «*le sue compositioni… sono chiamate barzellette*»). Negli ambienti colti non si parla che della controversia tra Liceti e Galileo. A Firenze come a Genova, a Bologna come a Siena, a Venezia come a Padova, a Milano come a Reggio, a Roma e altrove, a conferma che non esistono barriere politiche nella comunità scientifica italiana, c'è grande attesa della risposta di Galileo, che si spera possa essere presto stampata, o almeno fatta circolare in un maggior numero di copie trascritte a mano. La strategia funziona.

11. «*Lasserò che il mondo giudichi*»

Liceti, cui Galileo non ha ancora inviato la lettera a Leopoldo, lo sollecita: teme infatti che il suo ritardo nel confutarla possa venire ascritto all'essere stato messo in difficoltà dallo scienziato, nei cui confronti non sembra nutrire alcun complesso di inferiorità. Scrive infatti: «*se le sue difese mi parranno vere, goderò d'uscir d'errore; se altramente… lasserò che il mondo giudichi la nostra controversia, vedute le ragioni di ambidue*» (Galileo non lascia mai l'arbitraggio alla *vox populi*, seppure dei dotti, avendo ben più validi motivi a sostegno delle sue opinioni, e anzi si trova spesso a combattere proprio contro di essa). E così chiude Liceti: «*Se poi nelle mie opere io faccio pala dell'autorità di infiniti scrittori per confermare le mie opinioni, o pure di fondamenti dedotti dalla natura delle cose et dalla autorità di un solo, Aristotele, et talhora Platone, me ne rimetto a chi con occhi proprii le vede et con propria mano scrive li suoi sentimenti*». Parole perlomeno indelicate, queste ultime, indirizzate come sono a uno che è cieco e deve servirsi per scrivere della mano di altri.

Nell'estate del 1640 Galileo entra finalmente in possesso di una copia del *Litheosphorus* e Liceti, che trascorre le vacanze estive nella Repubblica Veneta – dove si appresta a dare alle stampe altri due libri – riceve copia della lettera di Galileo al Principe Leopoldo sul candore lunare e così gliene scrive: *«io mi sento molto obligato a ringratiarla delli molti e grandi motivi che mi porge di conservarmi più fissamente nella mia opinione»*! La sua ribadita intenzione di usare nella disputa, così come in tutti i suoi libri, il latino rivela non tanto l'incapacità ad utilizzare un linguaggio nuovo, quanto segna ancora una volta il crinale tra due mondi, quello di una scienza sterile destinata a circoli elitari, e quello di una scienza che, all'opposto, vuole rivolgersi democraticamente ad un pubblico ampio, che includa i giovani, e nuovo, i tecnici, alla cui sapienza può proficuamente attingere e contribuire.[7]

Intanto Liceti riceve da Pierre Gassendi – cui ha fatto pervenire ad Aix in Provenza una copia del suo *Litheosphorum* – una lunga lettera nella quale il grande matematico francese nemico della scolastica e difensore della ragione esamina nel dettaglio l'opinione di Liceti sul candore lunare, per poi dichiararsi in sostanziale disaccordo con lui.

12. Gli aristotelici insegnamenti

La lettera di risposta di Galileo contiene alcune importanti affermazioni. La prima riguarda la luce: Liceti gli ha attribuito l'opinione che essa sia «cosa materiale e corporea», mentre Galileo prudentemente afferma di essersi «*sempre tenuto tanto inhabile a poter penetrare che cosa sia il lume, che mi sarei esibito a star in carcere in pane e acqua tutta la mia vita, purché io fussi stato assicurato di conseguire una da me tanto disperata cognizione*». La seconda, orgogliosa, affermazione riguarda la sua certezza di osservare gli insegnamenti aristotelici con maggiore rigore di «*molti altri li quali indegnamente mi spacciano per avverso alla buona peripatetica filosofia*», mentre sono incapaci di seguire il primo insegnamento di Aristotele», «*quello del ben discorrere, argumentare, e dalle premesse dedurre la necessaria conclusione*». L'affermazione, non nuova in Galileo, qui risponde alla strategia culturale degli anni posteriori alla condanna: convincere appunto l'accademia che può esserci dialogo. Quanto al pubblicare le considerazioni sul candore della luna, se Liceti vorrà farlo, Galileo non si opporrà – dice – purché gli sia consentito di distenderle in miglior forma.

Nella lettera seguente, ribadito il suo essere autenticamente aristotelico – consistente «*nello sfuggire le fallacie del discorso, indirizzandolo et addestrandolo a ben silogizzare e dedurre dalle premesse concessioni la necessaria conclusione*» - Galileo aggiunge: «*credo di havere appreso dalli innumerabili progressi matematici puri, non mai fallaci, tal sicurezza nel dimostrare, che, se non mai, almeno rarissime volte io sia nel mio argumentare cascato in equivoci*». Vale a dire, il nuovo metodo e il nuovo sapere possono essere innestati sul tronco dell'antico, ma la matematica è indispensabile per «ben silogizzare», e pertanto è necessario sapersi servire di essa.

13. Un gran darsi da fare

La stima di cui gode Liceti presso gli amici di Galileo è ormai inversamente proporzionale al suo gran darsi da fare e alla quantità delle opere che produce. Ecco come il filosofo ci appare in una vivace descrizione che ne fa Francesco Rinuccini: *«non havendolo mai più visto, all'habitudine del corpo e fisionomia mi parve giusto un cantambanco, ma di minor reputatione assai di Rosaccio»*. Rinuccini aggiunge che a Padova tutti si ridono di lui, dai fattorini del libraio, al padrone della bottega *(«che mi ebbe quasi a far smascellare da le risa»)* per la sua mania di informarsi qua e là *«di quello che aveva scritto Ticone e il Cheplero, per metterlo in questa sua lettera»*, mania che ha indotto qualcuno a dirgli *«a posta alcune cose a rovescio, tanto si è reso questo gran Peripatetico ridicolo in quella città»*. Per Fulgenzio Micanzio Liceti è come *«un pittore che sopra la sua tavoletta havesse amassati molti colori et poi li caciasse l'un sopra l'altro sopra la tela et si credesse d'haver fatto una bella figura»*, parole che ne descrivono lo stile accumulatorio con grande efficacia.

E Galileo, a proposito di un recente libretto di Liceti su antichi enigmi così si esprime:

> veramente il trovare modo di adattare sensi e fisici e metafisici e teologici sopra parole che potrebbero essere state una semplice fantasia, per non dir chimera, del suo prolatore raddoppia in me la maraviglia delli ingegni tanto acuti e speculativi.

Giudizio graffiante, che indica che la strada da percorrere è esattamente opposta, quella di attenersi ai fatti e alle necessarie dimostrazioni. Se gli scritti di Liceti altro non sono che «filastrocche» (Rinuccini), egli stesso, nelle parole del matematico Raffaello Magiotti, è come un *«gran suonatore… che si fa lecito trimpellar tutta la notte il culascione,*[8] *senza lasciar mai riposar né bestie né christiani. Giuro per un orechio di questo musico, che altri può suonar ben meglio, ma non più di lui»*. Magiotti è tuttavia costretto a riconoscere che *«se l'autorità non passa per dimostrazione appresso i geometri, passa nondimeno appresso i Peripatetici,i quali vincono se non altro per il numero»*, constatazione amara, che ben sintetizza la condizione del tempo, e spiega la necessità degli sforzi di Galileo per trarre almeno alcuni dei peripatetici dalla sua parte.

14. *«Impresa... frustratoria»*

> Il problema o questione del centro dell'universo, e se in esso sia collocata la terra, è delle meno considerabili in astronomia […] il voler assegnar centro a quello spazio che non si sa né si può sapere quale sia la sua figura, né pure se egli di qualche figura sia figurato, è impresa, al mio parere, supervacanea e vana; onde il creder che la terra possa esser costituita in un centro, il quale non si sa se sia al mondo, è impresa, come ho detto frustratoria.

Parole lapidarie, con le quali Galileo, che si è fatto leggere «assai correntemente et alla spezzata» il libro del filosofo sulla posizione centrale della terra nell'universo, liquida l'intera questione. E così prosegue: *«per intendere e farsi possessore della scienza astronomica bisogna studiare altri che Aristotele, dalli scritti del quale non si comprende che egli ne possedesse niente di più di quello che ne intenda ogni ben semplice huomo»*. La

nuova fisica, cioè, non è ingenua, non si fida delle apparenze, va oltre ciò che in prima istanza sembra essere vero ai nostri sensi.

Galileo rinuncia qui all'arma dell'ironia, e a ogni cautela, il suo attacco si fa diretto. Dopo aver sottolineato l'inutilità di discutere intorno a ciò che non può essere dimostrato, espone il pensiero copernicano apertamente e aggredisce senza mezzi termini il principio di autorità. Ribadisce infatti:

> quando la filosofia fosse quella che ne i libri di Aristotele è contenuta, V. S. per mio parere sarebbe il maggior filosofo del mondo, tanto mi par che ella habbia alle mani et in pronto tutti i luoghi di quello. Ma io veramente stimo, il libro della filosofia esser quello che perpetuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi; ma perché è scritto in caratteri diversi da quelli del nostro alfabeto, non può esser da tutti letto: e sono i caratteri di tal libro triangoli, quadrati, cerchi, sfere, coni, piramidi et altre figure matematiche, attissime per tal lettura

(concetto già da lui espresso in termini molto simili nel 1624 ne *Il Saggiatore*).

Nel gennaio 1641 Liceti, ricevuta la lettera a Leopoldo – versione ritoccata in vista della pubblicazione – si mette subito all'opera per confutarla inserendola nel suo libro sul candore lunare. L'opera, spiega, sarà articolata in tre parti: nella prima esporrà le opinioni di tutti coloro che hanno scritto sull'argomento, divise in sei gruppi principali; nella seconda esaminerà diligentemente lo scritto di Galileo, dividendolo in 183 (!) capi; nella terza, farà lo stesso con la lettera di Gassendi. Il tempo richiesto per completare il libro finirà coll'impedire a Galileo di vedere l'unico lavoro di Liceti che lo avrebbe davvero interessato.

15. Del candore lunare, e d'altro ancora

Nel secondo dei tre libri del *De Lunae subobscura luce prope coniunctiones et in eclipsibus observata*, uscito a Udine nel 1642, Liceti pubblica integralmente la versione finale della lettera di Galileo al principe Leopoldo. Già si è detto della materia del contendere, e della tesi difesa da Liceti, considerata da Galileo un «leggiadro scherzo poetico».

La lettera, al di là del problema specifico che affronta e che oggi non riserva alcuna sorpresa, è tuttavia importante per molteplici ragioni. Essa costituisce infatti un esempio di esercizio letterario 'alto', nonché dell'abilità dialettica di Galileo e del suo inesorabile modo di procedere nello smantellare le posizioni dell'avversario; getta luce sui rapporti esistenti tra scienza e potere; esplicita, motivo questo di ancor maggiore interesse, la stretta unità che Galileo difende tra pensiero filosofico e scientifico; infine, come il *Saggiatore*, essa rappresenta una lezione, l'ultima, di metodo scientifico impeccabile.

Una volta sottolineata l'immotivata credulità del filosofo e la sua inabilità a maneggiare gli strumenti logici, Galileo ricorda che per assicurarsi della verità di un fatto

> non mancano circustanze, per le quali il senso, nella prima apprensione, può errare ed esser bisognoso di correzzione, da ottenersi mediante l'aiuto del retto discorso razionale [in quanto esso, il senso] si troverà potere essere, ed in fatto essere, il contrario di quello che a prima vista si giudica.

Il 'discorso razionale' non può comunque prescindere dalle esperienze, che possono essere impossibili a farsi, cioè solo pensate – *Gedanken-Experimenten* – oppure possibili. Galileo dubita che le prime farebbero mutar parere a Liceti, mentre le seconde, legate all'osservazione di ciò che cade sotto i sensi, risulteranno a lui di certo più utili e convincenti. Ma, prosegue Galileo, solo *«il discorso matematico serve a schivare quelli scogli, ne' quali talvolta il puro fisico porta pericolo d'incontrarsi e rompersi»*; l'errore primo di Liceti, sottolinea, è stato quello di aver voluto discorrere della questione *«tralasciando la matematica»*. Di certo, *«più poteva il Sig. Liceti, come fisicomatematico* – quale si era presentato – *raccorre dalle matematiche»*.

16. L'ultima lettera di Liceti

È del 20 luglio del 1641 l'ultima lettera che ci sia pervenuta di Liceti a Galileo: nulla aggiunge alla conoscenza del filosofo, ma in qualche modo la riassume:

> Dalla compitisima sua del 13 corrente vedo che teneva pensiero d'inviarmi alcune sue considerationi sopra il mio libro *De lucidis in sublimi*, e spetialmente attenenti a certi suoi dogmi, nelli quali pare che io no gli sia conforme di opinione. Riceverò sempre a favor particolare ogni sua specolazione, sperando di honorarmene et approfittarmene: fra tanto le rendo gratie del frutto che io son sicuro di cavare dalli suoi insegnamenti, li quali sto attendendo con desiderio. Per fine le bacio le mani di tutto cuore, pregandogli felicità.

Come si vede, Liceti è sempre convinto di poter discutere alla pari con lo scienziato e ritiene che se tra le loro opinioni ci sono divergenze esse siano solo apparenti o facilmente appianabili.

Il fallimento della educazione di Liceti, esempio vivente della difficoltà di comunicazione tra le due culture, non può non aver gettato ombre di scoramento nell'animo di Galileo. Testimonia questa sconfitta la sostituzione, nell'abbozzo della Giornata Sesta - scritto più tardi e da aggiungersi ai *Discorsi* – del personaggio di Simplicio con quello di un nobile di Treviso, Paolo Aproino, già allievo a Padova di Galileo, suo amico e partecipe di esperimenti con lui condotti. Galileo, con le parole di Sagredo, riconosce la difficoltà obiettiva di impadronirsi di nuovi strumenti per chi non sia cresciuto scientificamente utilizzandoli:

> Dell'assenza del Sig. Simplicio mi vo immaginando, anzi lo tengo per fermo, che cagione ne sia stata la grande difficoltà che egli ha incontrata in alcune dimostrazioni di vari problemi attenenti al moto; e più, di altre sopra le proposizioni del centro di gravità: parlo di quelle che, per lunghe concatenazioni di varie proposizioni degli elementi della geometria, vengono inapprensibili a quelli che tali elementi non hanno prontissimi alle mani.[9]

18. Epilogo

Galileo muore nella notte dell'8 gennaio 1642. Urbano VIII vieta che gli sia eretto un monumento funebre in S. Croce a Firenze. Il *Dialogo* sarà espunto dall'Indice dei libri proibiti solo due secoli più tardi (1835).

Liceti torna a occupare una cattedra all'Università di Padova e pubblica altri libri. Restano, inediti, suoi commenti alle opere cosmologiche di Aristotele, nei quali riconduce anche le più importanti scoperte astronomiche del Seicento a quanto già detto dal filosofo greco. Muore a Padova nel 1657. Lo avrebbe di certo inorgoglito sapere che a un cratere lunare del diametro di ben 75 km e profondo 3 km sarebbe stato dato il suo nome, *Licetus crater*, e non v'è dubbio che il nostro filosofo avrebbe saputo conciliare la presenza del cratere con la peripatetica luminosa perfezione della superficie lunare. Una sua statua, alquanto corrosa dal tempo, è tra quelle degli uomini illustri che ornano Prato della Valle a Padova. A Rapallo un vico e un liceo portano oggi il suo nome.

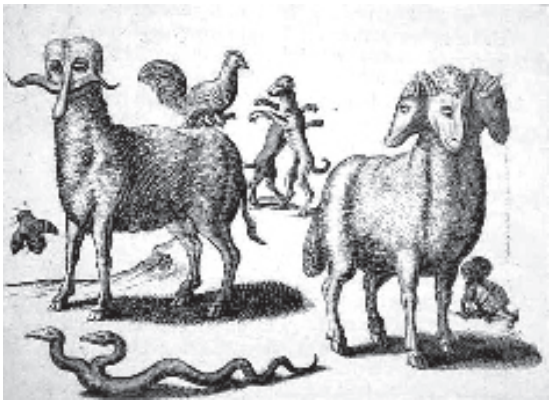


Figura 5 - Altri mostri del Liceti.

Note

[1] Questa, come tutte le seguenti citazioni di lettere *di* e *a* Galileo, sono tratte dai vol X, XI, XIII, XIV, XVI, XVII e XVIII dell'Edizione Nazionale delle *Opere* di Galileo Galilei a cura di Antonio Favaro, pubblicata dall'editore Barbera in Firenze (1890 -1907), e ristampata negli anni 1964-66.

[2] Le parole sono di Galileo in riferimento all'amatissimo Ariosto, in *Postille all'Ariosto*, Ed. Naz, IX.

[3] Ed. Naz. VIII, p. 41-318.

[4] *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Giornata seconda, p. 336. La citazione è tratta dall'edizione del *Dialogo* con introduzione e note a cura di Antonio Beltran Mari, BUR, RCS libri, Milano, 2003.

[5] *Lettere sulle macchie solari*, Ed. Naz. V, p. 187.

[6] *Dialogo*, Giornata terza, *op. cit*., p. 577.

[7] Si ricordi, in proposito, l'omaggio che nella pagina iniziale dei *Discorsi* Galileo rivolge alle abilità dei *proti*, i capomastri dell'Arsenale di Venezia, da lui frequentemente visitato.

[8] Si tratta del colascione (detto anche calascione o culassone), strumento a corde simile al liuto, popolare nell'Italia centro-meridionale del XVII secolo.

[9] Ed. Naz. VIII, p. 321.

L'attività dell'Accademia dei Fisiocritici

Sara Ferri

Presidente dell'Accademia dei Fisiocritici di Siena

Nel 1691 Pirro Maria Gabbrielli, insieme ai suoi allievi e colleghi, dette vita ad una Accademia scientifica nella quale si poté liberamente discutere sui fenomeni naturali andando anche contro la dottrina aristotelica. Fu coniato il nome "Fisiocritici" (giudici della natura), furono scelti come logo la pietra di paragone usata per riconoscere l'oro e l'argento falso e come motto il verso di Lucrezio: *veris quod possit vincere falsa*.



Figura 1 - Logo dell'Accademia.

Oltre alle discussioni, venivano fatti esperimenti con la macchina del vuoto – argomento all'epoca di grande attualità –, non solo tra gli accademici ma anche alla presenza di senesi e di personalità di passaggio a Siena, con l'intento così di divulgare la cultura. In seguito, su progetto di Gabbrielli, fu costruita una meridiana a camera oscura, sul modello delle quattro già esistenti al mondo, ma perfezionata per l'esame dei fenomeni astronomici.

L'Università ebbe con l'Accademia, considerata come polo sperimentale della sua area scientifica, sempre buoni rapporti tanto che dal 1692 al 1816 fu ospitata nell'edificio della Sapienza. Considerata una delle società culturali più famose d'Europa, tra gli accademici vi furono grandi scienziati come Carlo Linneo, Joseph-Louis Lagrange, Louis Pasteur e molti altri.

I Fisiocritici vissero anni di grande impegno scientifico alternati a periodi di crisi, dovuti essenzialmente a problemi finanziari e ad una ridotta attività universitaria per ragioni politiche: questa faceva venire meno la presenza a Siena di illustri cattedratici, che erano il motore propulsore dell'Accademia.



Figura 2 - Facciata della sede.

Il nucleo originario delle collezioni naturali, oggi conservate nel Museo, risale alla metà del XVIII secolo, anche se già il fondatore aveva una raccolta di minerali e rocce. Il Museo si poté sviluppare soltanto con l'ingresso nel 1816 nella attuale sede, un ex convento cinquecentesco donato dai Lorena; in questo antico edificio, dopo una complessa ristrutturazione, fu realizzata anche un'Aula Magna nel cui pavimento fu inserita una nuova meridiana a camera oscura, in ricordo di quella progettata dal fondatore.



Figura 3 - L' Aula Magna.

Nella nuova sede, con ambienti più ampi, gli Accademici poterono distribuire meglio le loro collezioni di storia naturale. Durante il 1800 queste aumentarono notevolmente attraverso donazioni e si costituirono 'I musei dell'Accademia': il museo d'Antichità con collezioni archeologiche e numismatiche, il museo Mineralogico e il museo Zoologico. Durante gli anni 30 del novecento i reperti antichi furono ceduti al Comune di Siena, mentre si ampiò il museo di Storia Naturale, costituito oggi da tre sezioni: geologica, anatomica e zoologica.



Figura 4 - Meridiana a camera oscura inserita nel pavimento dell'Aula Magna dell'Accademia, costruita nel 1848-1850.

Nella sezione anatomica particolarmente significativa è la raccolta Paolo Mascagni, appartenuta al noto studioso che dal 1789 al 1815 presiedette l'Accademia, costituita da preparati anatomici umani in cui aveva iniettato il mercurio per mostrare i linfatici, dalla prima iconografia colorata a grandezza naturale del corpo umano, dalla sua biblioteca. E' presente anche la collezione Francesco Spirito della prima metà del novecento con preparati anatomici trattati con processo di pietrificazione.



Figura 5 - Ingresso del Museo.

Nella sezione geologica, oltre campioni di fossili dei terreni pliocenici senesi, di rocce e di minerali, provenienti in gran parte da miniere del senese e grossetano, oggi non più attive, è da segnalare la collezione Ambrogio Soldani della seconda metà del settecento, primo studioso a comprendere l'importanza della micropaleontologia e il significato extraterrestre dei meteoriti. Caratteristiche sono anche le collezioni delle terre bolari, dei marmi antichi, dei marmi del duomo di Siena e delle acque minerali e

termali del senese.

La sezione zoologica ebbe un notevole incremento nell'ottocento per la presenza di un laboratorio di tassidermia, oggi di nuovo attivo dopo un lungo periodo d'interruzione, in cui furono e sono anche oggi preparati tanti esemplari della fauna prevalentemente locale. Di particolare valore la collezione ornitologica, una delle più importanti d'Italia, e quella dei mammiferi marini, in costante incremento: il continuo recupero di esemplari morti spiaggiati sulle coste toscane costituisce un notevole contributo all'attività di ricerca del Centro Studi Cetacei Italiano con cui esiste una consolidata collaborazione.



Figura 6 - Corte con scheletro di balenottera.

Nel Museo vi sono anche raccolte minori come quella teratologica, comprendente mostruosità animali, e quella paletnologica con manufatti litici e utensili in rame e bronzo. Sono da ricordare inoltre il primo erbario della flora senese del 1776 di Biagio Bartalini e la vasta collezione micologica della metà 800 realizzata in terracotta da Francesco Valenti Serini per evidenziare come gli avvelenamenti da funghi potevano essere prevenuti solo con la loro conoscenza morfologica.



Figura 7 - Collezione paleontologica.

Oggi l'Accademia ha una vita molto attiva: ha ripristinato la cerimonia dell'"Anno Fisiocritico" solennizzata già dai primi accademici nel giorno del patrono San Giustino,

filosofo e martire, con una prolusione di una personalità scientifica e consegna dei diplomi ai nuovi Accademici. Vi sono sedute scientifiche, durante le quali alcuni dei circa 250 accademici presentano i risultati delle loro ricerche, poi pubblicati sugli Atti dell'Accademia, il primo volume dei quali vide la luce nel 1761. Periodicamente vi sono conferenze di alto livello scientifico oppure divulgative in diverse discipline: scienze naturali, agricoltura, medicina, fisica ed altro. Annualmente sono realizzate piccole mostre temporanee di carattere didattico, per mettere in evidenza una o più collezioni esistenti nel museo.



Figura 8 - Collezione zoologica.

Attenzione particolare è stata dedicata agli utenti più assidui e numerosi, gli alunni delle scuole elementari di Siena e provincia, una volta "parcheggiati" nel museo, cercando di proporre, nonostante l'allestimento ottocentesco, un insegnamento attuale della scienza. Oggi la visita per i piccoli scolari, obbligatoriamente guidata dal personale del museo, è limitata ad un tema specifico concordato preventivamente con i docenti e collegato a collezioni esistenti in Accademia, tema sul quale i bambini sono stati già stati informati dai propri insegnanti. Per migliorare il rapporto tra scuola e museo è stata varata anche un'iniziativa "La Natura va al Museo. Dal Museo alla Natura": a seguito della visita le classi inviano elaborati che sono esposti in Accademia. L'inaugurazione di questa piccola mostra temporanea viene fatta alla presenza dei bambini, ai quali vengono regalati dei piccoli gadget, stabilendo così un legame che possa continuare in futuro.

I locali dell'Accademia sono stati recuperati e restaurati, mettendo a norma l'impianto elettrico, abbattendo le barriere architettoniche e cercando di avvicinarsi quanto più possibile agli standard museali chiesti dalla Regione Toscana. Inoltre è stato realizzato un percorso tattile per non vedenti adulti e bambini. E' stato ricostruito l'Heliometro Fisiocritico inaugurato nel 1703 da Gabbrielli, è stata rimessa in funzione in maniera virtuale la meridiana del 1850, progettata da Pianigiani, che taglia il pavimento dell'Aula Magna; è stata riprodotta in forma moderna, ma con gli stessi principi fisici dell'originale, la macchina per il vuoto del 1699. Questi strumenti vengono proposti ai visitatori grandi e piccoli con gli stessi esperimenti fatti dai Fisiocritici delle epoche

passate e destano sempre grande entusiasmo.

L'Accademia possiede anche una biblioteca scientifica con circa 35.000 volumi consultati da studenti e da specialisti e l'archivio, in cui sono presenti documenti e memorie fin dalla fondazione. E' in corso l'attuazione di un programma per mettere on line tutto il patrimonio posseduto dall'Accademia, libri e collezioni museologiche.



Figura 9 - Collezione micologica.

L'Accademia, dopo 316 anni di vita, mantiene quindi fede ai principi dei suoi fondatori accogliendo nella sua Aula Magna discussioni su varie discipline scientifiche e compie notevoli sforzi, nonostante carenze finanziarie, per la diffusione e il progresso delle scienze sperimentali, pure ed applicate.

Alexandre Koyré e la nascita della scienza moderna

Graziella Federici Vescovini

Dipartimento di Scienze dell'Educazione, Facoltà di Scienze della Formazione, Università di Firenze

Alexandre Koyré, storico della scienza di formazione cosmopolita, ma attivo a Parigi all'École Pratiques des Hautes Etudes nella prima metà del XX secolo (nato nel 1892 in Russia e morto nel 1964[1]),è stato uno dei più importanti studiosi che ha rivoluzionato le teorie di storia della scienza imperanti al suo tempo e cioè quelle delle opere accreditate della storiografia positivistica derivata dalla filosofia del positivismo di Auguste Comte, quali le *Mémoires scientifiques* di Paul Tannery (1904), *Le système du monde* di Pierre Duhem (1913-1917). Egli ha portato a maturità la storia della scienza, che dopo di lui si è articolata sugli aspetti più originali o anche discutibili della sua interpretazione.

Koyré ha coniato il concetto di 'rivoluzione scientifica', per la quale la storia della scienza non è altro che una storia di cambiamenti radicali, appunto rivoluzioni, rispetto alla situazione precedente. La nozione di rivoluzione scientifica ha però una pregnanza particolare perché per Koyré le idee scientifiche nuove, e rivoluzionarie, sono strettamente interdipendenti dal pensiero filosofico, dalle religioni, nascono nel tempo, nella storia, anche se le teorie scientifiche non sono altro che un *itinerarium mentis in veritatem*, cioè si collocano poi in un orizzonte atemporale.

Tuttavia, la verità scientifica non è il termine di un processo lineare e continuo, ma è il frutto di una brusca rottura, di una crisi. E il percorso non è rettilineo, ma tortuoso, a svolte e a rotture improvvise.

La concezione della storia della scienza secondo Koyré, cioè, come storia delle rivoluzioni scientifiche – con la connessa idea che la scienza moderna nasca con la rivoluzione astronomica di Galileo Galilei – fu sostenuta nei primi scritti di rilievo dedicati a Galileo, negli anni 1933-1940. Essi furono poi raccolti nel volume dal titolo *Les Etudes galiléiennes*, tradotte presso l'editore Einaudi di Torino nel 1972.

La scienza moderna, e con essa la nascita del mondo moderno, sarebbe derivata da una diversa visione del mondo e del cosmo rispetto a quella dell'Antichità classica e del Medioevo (differente dalla concezione geocentrica con la terra al centro della cosmologia aristotelico-tolemaica) e sarebbe rappresentata dall'eliocentrismo di Copernico e di Galileo. Questo cambiamento fu brusco secondo Koyré: fu una vera e propria rottura radicale; si passò così da un'epistemologia, o dottrina della conoscenza, *qualitativa* quale quella della fisica di Aristotele, a una epistemologia *quantitativa*, matematica, fondata su una omogeneità di termini, su una rigorosa formalizzazione matematica dei fenomeni fisici.

Così Koyré contrappone il cosmo chiuso di Aristotele, sfera del pressapoco e della imprecisione qualitativa del senso comune[2], alla spiegazione matematica mediante leggi rigorose dei processi della natura: le leggi della meccanica galileiana sono contrapposte alla 'filosofia naturale' o fisica, del mondo di Aristotele; ed in questo senso Koyré legge le famose pagine del *Saggiatore* in cui Galileo esprime la sua idea che la natura sia scritta secondo figure geometriche, secondo angoli, circoli e triangoli.

Koyré, in questi celebri studi galileiani, avvicina Galileo a Platone e li contrappone ad Aristotele. Si ha così un ritorno a Platone, a un'interpretazione platonica di Galileo contro l'interpretazione positivistica che faceva di Galileo un empirista, uno scopritore del metodo sperimentale che avrebbe unito l'osservazione con la spiegazione matematica: Galilei sarebbe perciò stato, secondo Koyré, un oppositore dell'apriorismo sterile dell'ontologia e della fisica proprie della Scolastica aristotelico-medievale, e un platonico.

Nel saggio su Galilei e Platone, che è del 1943, Koyré mette in luce questa idea, per cui la rivoluzione scientifica operata da Galileo sarebbe consistita nella espressione di una diversa *forma mentis*, nella ripresa del primato della matematica come idea reale e costitutiva del mondo fisico: ossia afferma la dottrina che il linguaggio della scienza è matematico, che l'esperimento è secondario rispetto alla teoria, che la formalizzazione matematica precede i fatti.

L'interpretazione del platonismo di Galileo ha dato molto a discutere. Questo platonismo sarebbe un realismo matematico sostanziale, un matematismo teorico che metterebbe da parte la rilevanza sia del metodo che dell'esperimento. Pertanto Koyré dette poca rilevanza alle scienze 'baconiane', cosiddette dall'opera di Bacone: ottica, medicina, chimica – quelle scienze definite come 'operative'. Egli rimase pertanto cieco agli aspetti pratici, sperimentali, dell'impresa scientifica. Per questo gli esperimenti di Galileo agli occhi di Koyré non sarebbero stati rilevanti per le scoperte galileiane delle leggi del moto.

Molti studiosi, contemporanei o successivi, hanno guardato con un forte accento critico a quest'interpretazione, come a quella del platonismo di Galileo inteso come puro matematicismo. La dottrina delle idee di Platone è stato solo un idealismo matematico? O fu anche altro? (c'è infatti nella dottrina di Platone anche una teoria dell'idea come valore, come virtù, come bene) ossia esiste anche un'altra interpretazione (quella etica) del platonismo di Platone per non parlare della rivalutazione religiosa di Agostino e del Cristianesimo dell'idea del Bene, rispetto a quella matematica? In altri termini il Platonismo di Galileo visto da Koyré sarebbe una ripresa dell'ultimo Platone del *Teeteto* o del *Sofista,* e meno del Platone del *Timeo,* dove la scienza fisica si muoverebbe nell'ambito del verosimile e non del vero, e ancor meno di quello della *Repubblica* e delle *Leggi*. Un certo Platone dunque contro Aristotele, Galileo contro Tolomeo e le cosmologie medievali degli arabi aristotelico-tolemaici.

Un'altra idea fondamentale della storia della scienza moderna di Koyré è che l'influenza delle teorie filosofiche (in questo caso il Platonismo di Galileo) sia un

elemento essenziale per la nascita delle rivoluzioni scientifiche. La storia della scienza è quindi una storia delle *crisi*, delle *rotture*, nelle visioni del mondo che si sono avute lungo i secoli, ed esse sono strettamente interdipendenti con le teorie filosofiche e le idee religiose. Così Koyré ha collegato la storia delle scienza con la storia delle filosofie, ma anche delle religioni, così come anche con il contesto storico e sociale, anche se in modo minore.

Inoltre Koyré ha separato nettamente la storia della scienza dalla storia della tecnica, che rappresenterebbe l'aspetto esteriore della scienza, ossia le sue applicazioni che niente a suo parere hanno a che vedere con la teoria scientifica. Pertanto Koyré è il teorico della discontinuità del pensiero scientifico e si contrappone agli storici della scienza soprattutto di formazione positivista che vedono la storia della scienza come un processo lineare di *accumulazione* di conoscenze lungo i secoli, senza rotture né cambiamenti radicali. Koyré è contrario all'idea della *continuità* del sapere scientifico come un progresso lineare.

Per questo, quasi tutti gli storici della scienza medievale, che sono per lo più i sostenitori di una continuità nella storia della scienza, si sono opposti a questa visione 'rivoluzionaria' della nascita della scienza moderna di Koyré che contrappone radicalmente la scienza antica e medievale (se c'è stata) alla scienza moderna. Nel Medioevo non ci sarebbe stato, a suo avviso, nessuno scienziato e nessuna scienza perché la scienza nascerebbe con la modernità, con la rivoluzione epistemologica e cosmologica dell'eliocentrismo; essa sarebbe stata una secolarizzazione della conoscenza, da fini trascendenti a scopi immanenti, con la perdita della visione del mondo medievale in cui l'uomo viveva: ossia il mondo chiuso e finito con la terra al centro si rompe e si apre a infiniti mondi.

Nel 1954 Koyré pubblica il saggio *De l'influence des conceptions philosophiques sur l'évolution des théories scientifiques* in cui esemplifica nella storia della filosofia un caso emblematico di questa sua idea fondamentale e cioè l'incidenza primaria delle idee filosofiche anche provenienti da altri campi, come la religione, per la nascita della rivoluzione scientifica dell'età moderna.

Infatti, in un saggio pubblicato da Feltrinelli, nel volume miscellaneo *Dal mondo chiuso all'universo infinito* che è del 1957, Koyré dedica uno studio all'importanza della cosmologia di Nicola Cusano per la rivoluzione scientifica moderna collegata all'idea eliocentrica, come pure alla teoria della possibilità di infiniti mondi. Koyré riterrà una novità straordinaria la concezione cosmologica di Nicola Cusano svolta nel secondo libro della *Dotta Ignoranza* [1] opera redatta nel 1440, secondo la quale Cusano sviluppa una'articolata dottrina per cui la visione dell'universo viene ampliata, allargata all'infinito e così la concezione di Tolomeo e di Aristotele che avevano posto la terra al centro è completamente sovvertita; i centri del mondo sono relativizzati, al punto da poter concludere sull'infinità dei centri l'infinità dei mondi che dipendono da essi.

Per questa visione cosmologica Cusano è stato interpretato, anche sulla scia dell'interpretazione di Koyré, come un anticipatore dell'eliocentrismo di Galileo, anche

se poi questa interpretazione non è esatta, in quanto Cusano è piuttosto l'ideatore di un cosmo infinito e indeterminato. Tuttavia Cusano esemplifica bene l'idea stessa di Koyré, che le novità scientifiche rivoluzionarie hanno avuto spesso un fondamento filosofico e, nel caso di Cusano, un fondamento religioso. Infatti la *Dotta Ignoranza,* che è opera di filosofia cristiana, è centrata su alcune idee nuove che ne fecondano la dottrina.

Essa è divisa in tre libri, il primo tratta di Dio ed è argomento teologico, il secondo tratta del mondo ed è cosmologico, il terzo tratta di Cristo uomo-Dio ed è antropologico. L'idea che applica ai suoi temi è quella dell'infinito: Dio è infinito 'negativo' cioè trascendente la realtà naturale; il cosmo è infinito 'privativo', ossia senza confini determinati. E Cristo uomo-Dio è infinito, contratto massimamente nell'umanità. Cusano perviene a quest'idea applicando una definizione di un testo pseudo-ermetico del XII secolo, il *Libro dei 24 filosofi* [2].

In questa operetta si racconta che ventiquattro saggi si riunirono per interrogarsi sulle definizioni di Dio, ed ognuno di essi espose una sua formula di Dio. Tra queste, quella che viene ripresa da Cusano è applicata al cosmo: la definizione che Dio è quella sfera infinita il cui centro è dappertutto e la circonferenza in nessun luogo è applicata al mondo e ciò comporta che esso non abbia più un centro fisso, né una circonferenza che lo determina, ossia l'ottava sfera che racchiude il firmamento così come era concepito nella dottrina del cosmo aristotelico-tolemaico. L'ottava sfera delimita totalmente l'universo con i sette cieli e la terra in basso.

Se si applica questa definizione pseudo-ermetica e la si estende all'universo chiuso di Aristotele e Tolomeo come fa Cusano, poiché la sfera è infinita e tale infinità si estende al cosmo, ne consegue che la terra non è più il centro del mondo perché esso è *infinito*: si dà così la possibilità di infiniti mondi e quindi di infiniti centri da cui i mondi dipendono: il cosmo si apre perché, se la terra non è il centro, non ci sarà nemmeno una circonferenza che la delimita, dunque si apre la possibilità di altri mondi oltre il nostro, poiché il mondo è senza limiti.

Per questa dottrina filosofica-religiosa Koyré vede in Cusano un caso esemplare della relazione tra le idee filosofiche e del loro contributo positivo ai cambiamenti delle visioni del mondo. Pertanto, la visione cosmologica di un universo infinito di Cusano, dipendente dalla sua idea teologica di Dio, sfera infinita il cui centro è dappertutto e la circonferenza in nessun luogo, sarebbe un esempio altamente significativo dell'idea di una *rottura radicale* della scienza moderna rispetto a quella medievale. Essa sarebbe dovuta a questa rivoluzione cosmologica operata da Cusano, il quale era poi un filosofo platonico: così concepiva la natura scritta in caratteri matematici secondo angoli, triangoli e sfere e pertanto rientrava nella interpretazione di Koyré che la scienza moderna, alla cui idea Cusano avrebbe contribuito, fosse esclusivamente una teoria matematica, avulsa dall'esperimento.

Tutta l'opera di Koyré è infatti stata svolta contro le interpretazioni positiviste di storia della scienza e in particolare dell'opera di Galileo soprattutto quelle che

insistevano sull'importanza del metodo sperimentale e dell'osservazione piuttosto che sulla razionalizzazione matematica della natura. In particolare Koyré critica la tesi di Alistaire Crombie, sviluppata nel celebre studio *Da Agostino a Galileo e La nascita del metodo sperimentale* (che è del 1954), tutta imperniata sull'importanza dell'opera ottica di Roberto Grossatesta (morto nel 1250), interpretata in senso sperimentale-matematico. Crombie avrebbe sottolineato l'idea della dottrina di Grossatesta (che era anch'essa una versione di platonismo) che la realtà fosse luce, che le forme fisiche luminose si costituiscono in sfere, circoli , triangoli e linee rette e questa dottrina matematica della luce di Grossatesta era stata avvicinata da Crombie al matematismo di Galileo.

Koyré sottolinea giustamente come in questo caso si fosse ancora in presenza di una metafisica della luce che doveva molto all'ontologia qualitativa di Aristotele e aveva poco a che fare con una fisica quantitativa; la matematica di Grossatesta era ancora un simbolismo qualitativo e non spiegava la realtà naturale secondo rigorose leggi quantitative.

La sua polemica antipositivista si cimentò anche con l'interpretazione del fisico e storico Pierre Duhem, *Le système du monde*, il quale in questa opera aveva insistito sull'importanza dell'astronomia matematica medievale di Tolomeo e dei suoi seguaci arabi-latini perché dalla loro impostazione metodologica consistente nel principio di *Salvare i fenomeni*, essi non pretendevano di spiegare la realtà fisica *in sé*, ma *come essa appare* e avevano dato delle spiegazioni geometricamente soddisfacenti. Pertanto essi avrebbero introdotto una nozione molto vicina a quella positivista che distingue la spiegazione del fenomeno dall'essenza: ossia il fenomeno, l'apparenza, dal noumeno o dalla realtà in sé, secondo la terminologia di Kant.

E questa dissociazione appare a Koyré perniciosa per la storia della scienza. Così, attaccando l'interpretazione di Duhem, Koyré contribuisce a chiarire di nuovo la sua concezione della scienza moderna, quale teoria in cui la legge matematica o la teoria coincidono con la realtà fisica. Pertanto la rottura della scienza moderna dalla non-scienza dei medievali che (nell'astronomia tolemaica, per il principio di *Salvare i fenomeni*, con le regole geometriche degli eccentrici e degli epicicli) avevano dissociato il fenomeno del noumeno, consisterebbe proprio in questa coincidenza tra teoria della spiegazione del fenomeno e la sua realtà.

Koyré negli ultimi anni della sua vita modificò un poco le sue affermazioni limitative della scienza astronomica medievale, riconoscendo che anche per gli astronomi di quei secoli il calcolo era essenziale. Però rimane la sua critica per la quale, poiché questi non credevano che i loro calcoli esprimessero la 'realtà' del mondo, e si limitavano a descrivere anche se con insufficiente precisione matematica, solo 'l'apparenza' del fenomeno, essi non giunsero all'idea propria della scienza fisica secondo Koyré, ossia che la realtà fisica si presti ontologicamente a un'analisi guidata dalla ragione.

Per concludere con il riconoscimento del debito che, nonostante tutto, dobbiamo ancora alla storiografia scientifica di Koyré, non possiamo tuttavia non rilevare alcuni limiti di metodo: in altre parole egli, con la sua impostazione metodologica, considera,

da un lato, la scienza come un prodotto della storia umana, come una «rivoluzione»[3] intellettuale e, quindi, la relativizza alle condizioni nelle quali si è prodotta, dall'altro si pronuncia contro tutte le spiegazioni delle trasformazioni storiche e sociologiche che possono averla promossa. Parla dell'evoluzione del sapere come «il cammino verso la verità», cammino compiuto con la geometrizzazione e la matematizzazione della struttura ontologica del mondo, come se le condizioni da cui sono nate non contassero più. Così mette da parte tutti gli altri aspetti delle teorie scientifiche, sperimentalismo, convenzionalismo, neo-positivismo etc.

Pertanto, l'ideale della scienza moderna che Koyré ci ha tramandato cade in questa o quella variante di platonismo. È chiaro, così, che proprio il principio sostenuto dal Koyré, secondo cui le idee filosofiche possono influenzare variamente il pensiero scientifico, ci conduce alla constatazione di diversi concetti di scienza e alla distinzione tra l'ideale della scienza che è culturale, e quello relativo ai metodi e alle ragioni della realizzazione della scienza stessa.

Note

[1] Sulla vita e le opere di Koyré cfr. introduzione di Paola Zambelli, *A. Koyré, Dal mondo del pressapoco all'universo della precisione*, Torino, Einaudi, 2000, 3a ed., pp. 7-46 e il volume degli Atti a cura di Carlo Vinti, *Alessandro Koyré. L'avventura intellettuale*, Napoli, edizioni scientifiche, 1994 (in particolare qui il mio studio, *Koyré e la scienza medievale*, pp. 203-221).

[2] Cfr. nota 1.

[3] Si vedano ora le discussioni della interpretazione di rivoluzione scientifica di Koyré nell'opera di Thomas Kuhn in particolare *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (trad. it. Torino, Einaudi, 1969), di Lakator e Feyereband (cfr. *Rivoluzioni scientifiche* in Nicola Abbagnano, *Dizionario di filosofia*, nuova edizione a cura di Giovanni Fornero, Utet 1998, *ad vocem*).

BIBLIOGRAFIA

[1] Nicola Cusano, *La dotta ignoranza*, introduzione, traduzione e note di Graziella Federici Vescovini, Roma, Città Nuova, 2a ed., 1992.

[2] *Le Livre des XXIV Philosophorum*, testo latino, traduzione francese di François Hudry, Grenoble, Millou, 1989.

[3] Mario Quaranta, *Bibliografia italiana di/su Alexandre Koyré*, in Carlo Vinti editore, *Alexandre Koyré, L'avventura intellettuale*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli 1994, pp. 721-729.

Poincaré matematico e filosofo

Gaspare Polizzi

Facoltà di Scienza della Formazione, Università di Firenze
Liceo Classico «Galileo», Firenze

In *Scienza e metodo* (1908), scrivendo sul ruolo del caso in fisica Jules-Henri Poincaré proponeva con una metafora la corrispondenza tra fisica e storia: come nei fenomeni fisici casuali una piccola causa può produrre grandi effetti, così nella storia un caso può determinare grandi conseguenze, e il caso più grande si verifica quando nascono grandi uomini che mutano il corso della storia [10], pp. 49-53. Poincaré fu un grande uomo, forse l'ultimo grande scienziato moderno: nella sua biografia intellettuale si rintraccia il punto di biforcazione fra le tre principali direttrici teoriche della fisica odierna: la fisica del caos, la teoria della relatività, la teoria dei quanti. Si potrebbe aggiungere che forse senza Poincaré non sarebbe stato così mirabilmente prodotto quel grandioso sistema complesso costituito dalle teorie fisiche del Novecento. L'opera di Poincarè copre con risultati di tale rilievo la matematica, la fisica, l'astronomia, la cosmologia e l'epistemologia del Novecento, da mantenere in tutti questi settori un alto grado di attualità.

1. Poincaré nel quadro attuale delle scienze

Cercherò di dimostrare perché è importante parlare di Poincaré oggi, nel quadro attuale delle scienze e perché Poincaré non è soltanto un grande scienziato, ma anche un grande filosofo, che ha posto in rapporto la sua professione di matematico con alcune questioni rilevanti nella filosofia della scienza e nell'epistemologia. Parto da due notizie d'attualità.

Il matematico Grigorij Perelman è stato proposto nell'estate del 2006 per la Medaglia Fields, il premio Nobel dei matematici, per aver dimostrato la «congettura di Poincaré», che recita: «Se un oggetto tridimensionale dato ha le proprietà – compattezza, connessione semplice, assenza di bordi eccetera – di una sfera, non può che essere la deformazione di una sfera». Nonostante la figura controversa di Perelman, che non ha ritirato la medaglia e non è reperibile, la vicenda illustra simbolicamente l'attualità di alcune ricerche matematiche di Poincaré, che hanno dato luogo alla topologia algebrica e ancora oggi sono oggetto di dimostrazione. Poincaré, fondando la topologia algebrica, aveva posto i seguenti interrogativi:

1. Qual è il tipo di varietà geometrica tridimensionale semplicemente connesso[1]?
2. Ve ne sono altrettanto semplicemente connesse o è unico?

3. Che tipi di varietà tridimensionali esistono?

Nelle sue ricerche Perelman ha risposto a tutte e tre le domande, contribuendo così alla sistemazione odierna della topologia algebrica. Le risposte alle prime due domande sono, rispettivamente: *ad* 1) la sfera, *ad* 2) è unico, mentre per rispondere alla terza Perelman ha realizzato una complessa classificazione delle varietà tridimensionali a partire dalle tre varietà bidimensionali di base, a curvatura costante positiva (sfera), a curvatura zero (toro), a curvatura negativa (sella).

Un'altra vicenda dei nostri giorni riguarda la proposta di assegnare il premio Nobel per il 2006 al fisico italiano Giorgio Parisi. Anche in questo caso il legame con Poincaré è particolarmente forte, e soprattutto con la sua teoria del «caos deterministico».

Parisi ha condotto studi sui sistemi dinamici non lineari per descriverne il comportamento. In particolare, si è soffermato sui vetri di spin**,** leghe di oro e ferro che hanno un comportamento magnetico anomalo a bassissime temperature e che si presentano come sistemi non lineari. Parisi ci ricorda come non è possibile una comprensione completa dei fenomeni nel quadro di sistemi non lineari: tale comprensione si può ottenere solo quando il comportamento del sistema è lineare, cioè quando la reazione di ogni componente del sistema è esprimibile nei termini di una funzione lineare della perturbazione esterna, come per esempio nelle molle di buona qualità, dove l'allungamento è proporzionale alla forza. E aggiunge che

> Molti di questi problemi fortemente non-lineari rimangono come dei puzzle irrisolti attorno ai quali si concentra l'attività dei fisici. Una teoria generale dei sistemi non-lineari non è al momento disponibile e solo in alcuni casi fortunati esiste una trattazione teorica soddisfacente, che non faccia uso della teoria delle perturbazioni rispetto a un sistema lineare [7], p. 33.

Ci ritroviamo così nel pieno di quella visione complessa della natura che Poincaré aveva studiato nelle ricerche che andranno sotto il nome di «caos deterministico» ed evocato già nel suo primo libro divulgativo, *La scienza e l'ipotesi* (1902), dove scriveva:

> Dunque, siamo portati ad agire come se una legge semplice fosse, a parità di tutte le circostanze, più probabile di una legge complicata. Mezzo secolo fa si confessava francamente e si proclamava che la natura ama la semplicità; ma è stata proprio la natura che in seguito ci ha dato troppe smentite [9], p. 152.

2. Qualche notizia biografica

Prima di illustrare la visione fisico-matematica di Poincaré fornisco qualche informazione sulla sua biografia intellettuale e scientifica[2].

Nato nel 1854 a Nancy, Jules Henri compie i primi studi nella sua città natale; in seguito, partecipa ai concorsi per l'ammissione all'*École Polytechnique* e all'*École normale supérieure* e li vince entrambi, ma sceglie la prima delle due grandi scuole. Nel 1879, a venticinque anni, è dottore in matematica e inizia a insegnare all'Università di Cannes. Da quel momento la sua carriera universitaria è lineare. Accumula trentuno anni di

impegno accademico ininterrotto, segnati sostanzialmente da due importanti passaggi: quello che nel 1886 lo conduce dall'insegnamento di analisi matematica a quello di fisica matematica e calcolo delle probabilità (occuperà questa cattedra fino al 1896), e quello che nel 1896 lo porta a insegnare Astronomia matematica e Meccanica celeste. Si tratta dei due più importanti momenti di passaggio della sua carriera universitaria e della sua ricerca, che configurano un deciso spostamento negli interessi scientifici.

La sua biografia intellettuale è infatti divisa nei tre ambiti dell'analisi matematica, della fisica matematica e della meccanica celeste. In tutti e tre questi settori i contributi di Poincaré sono della massima importanza. Nel primo sono decisivi i suoi apporti in analisi, teoria delle funzioni e topologia algebrica; nel secondo i contributi all'elettrodinamica, all'ottica e all'elettromagnetismo; nel terzo significativi gli studi di cosmologia e astrofisica. Probabilmente, nessuno scienziato oggi potrebbe ripercorrere la varietà di studi e di settori di ricerca di Poincaré.

Le sue memorie scientifiche sono quasi cinquecento e le *Œuvres* scientifiche, che raccolgono l'insieme della sua produzione scientifica consistono di undici volumi di diecimila pagine [8]. Al fondo si riscontra l'atteggiamento scientifico di un matematico, che rimane fermo in tutta la sua produzione, paragonata per vastità e profondità a quella di Karl Friedrich Gauss, e insieme un'attenzione costante alla fisica, nella quale vede la vera sorgente dei problemi matematici.

3. Le ricerche sul «caos deterministico»

Guardiamo ora agli aspetti di novità del pensiero fisico-matematico di Poincaré, iniziando con la teoria del «caos deterministico». Nella fortunata opera divulgativa citata all'inizio, *Scienza e metodo*, il matematico di Nancy propone tre chiari esempi di equilibrio instabile:

> Il primo esempio che sceglieremo è quello dell'equilibrio instabile; se un cono poggia sulla punta, noi sappiamo che cadrà, ma non sappiamo da quale parte; ci sembra che a deciderlo sia il semplice caso. Se il cono fosse perfettamente simmetrico, se il suo asse fosse perfettamente verticale, se non fosse sottomesso a nessun'altra forza all'infuori della gravità, non cadrebbe affatto. Ma il minimo scarto dalla simmetria lo farà pendere leggermente da un lato o dall'altro, e dal momento in cui penderà, anche di poco, cadrà del tutto da quella parte. Se anche la simmetria fosse perfetta, una leggerissima trepidazione, un soffio d'aria potrà farlo inclinare di qualche secondo d'arco; sarà abbastanza per determinarne la caduta e il senso della stessa, che sarà quello dell'inclinazione iniziale.
>
> Una causa trascurabile, che ci sfugge, determina un effetto considerevole che non possiamo non vedere, e allora diciamo che questo effetto è dovuto al caso. Se noi conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell'universo all'istante iniziale, potremmo predire esattamente la situazione di questo stesso universo in un istante successivo. Ma, quand'anche le leggi naturali non avessero più segreti per noi, non potremmo conoscere la situazione iniziale se non *approssimativamente*. Se ciò ci permette di prevedere

> la situazione successiva *con la stessa approssimazione*, questo è tutto ciò di cui abbiamo bisogno, e diciamo allora che il fenomeno è stato previsto, che è regolato da certe leggi; ma questo non succede sempre, può succedere infatti che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne generino di grandissime nei fenomeni finali; un piccolo errore nelle prime produrrebbe un enorme errore sugli ultimi. La predizione diventa impossibile e noi siamo di fronte ad un fenomeno fortuito.
>
> Il nostro secondo esempio, preso a prestito dalla meteorologia, avrà molte analogie col primo. Perché i meteorologi incontrano tante difficoltà nel predire il tempo con qualche certezza? Perché le piogge, e persino le tempeste ci sembrano arrivare per caso, in modo che molta gente trova naturale pregare per avere la pioggia o il bel tempo, mentre giudicherebbe ridicolo chiedere un'eclisse con una preghiera? Noi notiamo che le grandi perturbazioni hanno luogo generalmente nelle regioni in cui l'atmosfera è in equilibrio instabile. I meteorologi vedono chiaramente che questo equilibrio è instabile, che un ciclone sorgerà da qualche parte; ma dove, non sono in grado di dirlo; un decimo di grado in più o in meno in un punto qualsiasi, e il ciclone scoppia qui e non là, provocando le sue devastazioni su zone che avrebbe altrimenti risparmiato. Se avessimo conosciuto questo decimo di grado, avremmo potuto saperlo in anticipo, ma le osservazioni non erano né abbastanza serrate ne abbastanza precise, e così tutto ci sembra dovuto all'intervento del caso. Anche qui troviamo lo stesso contrasto tra una causa minima, non apprezzabile dall'osservatore, e degli effetti considerevoli, che sono a volte degli spaventosi disastri.
>
> Passiamo ad un altro esempio, la distribuzione dei piccoli pianeti sullo zodiaco. Qualunque fossero le loro longitudini iniziali, i loro moti medi erano diversi ed essi circolano da talmente tanto tempo che possiamo dire che attualmente essi sono distribuiti a caso lungo lo zodiaco. Piccolissime differenze iniziali tra le loro distanze dal sole, oppure, che fa lo stesso, tra i loro moti medi, hanno finito per produrre enormi differenze tra le loro longitudini attuali; un eccesso di un millesimo di secondo nel moto medio diurno, darà infatti un secondo in tre anni, un grado in diecimila anni, una circonferenza intera in tre o quattro milioni di anni: che cos'è questo in confronto al tempo che è trascorso da che i piccoli pianeti si sono staccati dalla nebulosa di Laplace ? Ecco dunque ancora una volta una piccola causa ed un grande effetto; o meglio piccole differenze nella causa e grandi differenze nell'effetto [10], pp. 49-50.

Vorrei innanzitutto far notare come il secondo esempio, quello tratto dalla meteorologia, sia estremamente moderno. Sarà il meteorologo Edward Lorentz a definire tali fenomeni caotici con l'espressione «effetto farfalla». L'individuazione di sistemi non-lineari, lontani dall'equilibrio, costituisce il nuovo orizzonte di riferimento nel quale si sviluppano le indagini matematiche di Poincaré applicate all'astronomia che daranno luogo alla matematica del «caos deterministico». L'occasione è propiziata dalle ricerche astronomiche e dal tentativo di validare il determinismo cosmico derivato dalla teoria newtoniana e realizzato nella sintesi laplaciana.

Il problema cosiddetto dei 'tre corpi', consistente nella definizione delle interazioni gravitazionali relative a tre (o più) corpi celesti tramite il calcolo delle perturbazioni reciproche, era noto già al tempo di Newton. Esso aveva avuto una prima «soluzione» di tipo teologico, con Newton e con Leibniz. Alexandre Koyré ha ricordato che Newton sosteneva l'idea del cosiddetto «Dio dei giorni feriali», ovvero di un Dio che interviene correggendo le perturbazioni via via che esse si producono, Leibniz invece propendeva per il cosiddetto «Dio del Sabbath», cioè di un Dio che predispone fin dall'inizio la perfezione del sistema astronomico [4], pp. 178-205.

Naturalmente, il difetto non sta nella teoria di Newton, che ben rappresentava l'ordine del cosmo, ma il problema è dovuto al fatto che in natura non si dà un sistema fisico isolato e che vanno considerate tutte le possibili perturbazioni legate all'interazione di tre o più sistemi di riferimento. Si tratta di trovare gli strumenti matematici che possano trattare un'enorme varietà di possibili evoluzioni di sistemi individuali. L'importanza del problema venne attestata dal ricco premio proposto per la sua soluzione dal re Oscar II di Svezia nel 1889. Il bando del concorso richiedeva di «sviluppare le coordinate di ogni particella in una serie che procede secondo qualche funzione nota del tempo e che converge uniformemente in ogni intervallo di tempo» [1], p. 28[3]. Si trattava di fornire delle soluzioni matematiche al problema astrofisico della stabilità del sistema solare, dove si danno tre o più corpi che interagiscono con perturbazioni gravitazionali che modificano le traiettorie teoriche dei corpi considerati. In altri termini, le traiettorie effettive dei corpi celesti del sistema solare non corrispondono alle traiettorie teoriche, perché vi sono perturbazioni gravitazionali. Ora, quali sono le soluzioni matematiche che possono permettere di includere queste perturbazioni all'interno delle traiettorie?

Poincaré vince il premio fornendo tre possibili soluzioni matematiche:

- una soluzione periodica, che considera la possibilità del ritorno dei corpi alle stesse posizioni e alle stesse velocità relative;
- una soluzione asintoticamente periodica, che considera la possibilità di un avvicinamento sempre più costante al caso periodico;
- una soluzione doppiamente asintotica, che considera le traiettorie prossime a quelle periodiche, soltanto per i casi di un futuro molto lontano e di un passato anch'esso molto lontano.

Uno dei membri della commissione giudicante, Weierstrass, scrisse che quella di Poincaré era una pubblicazione destinata ad aprire un'era nuova nella storia della meccanica celeste.

L'efficacia delle ipotesi proposte da Poincaré poggiava soprattutto sulla potenza degli strumenti matematici, favorita dalla scoperta delle funzioni automorfe, funzioni che sviluppano un isomorfismo di un gruppo di trasformazioni su se stesso. Tale scoperta, che ha la sua radice nelle ricerche di Felix Klein e di Sophus Lie, che nel 1870 si erano ritrovati a Parigi elaborando insieme l'idea di applicare la teoria dei gruppi alle teorie

geometriche a partire dallo studio del *Traité des substitutions* (1870) di Camille Jordan e di ricercare la corrispondenza tra gli assiomi di una geometria e i gruppi algebrici di trasformazioni, testimonia la propensione di Poincaré all'analisi matematica e l'esigenza di stabilire un'interazione stretta tra analisi, geometria e fisica.

Nascerà così la topologia algebrica, che muove dallo studio delle funzioni algebriche a due variabili e descrive curve algebriche piane.

Per studiare le funzioni automorfe Poincaré divide il piano complesso in un numero infinito di parallelogrammi tutti uguali fra loro (a partire da un parallelogramma qualsiasi si ottengono tutti gli altri mediante le trasformazioni di gruppo). Il gruppo di trasformazioni associato a una funzione fuchsiana (tipo particolare di funzione automorfa generata dall'inversione del rapporto di due integrali delle soluzioni di un'equazione differenzialelineare di secondo ordine) compone poligoni i cui lati descrivono archi di circonferenza. La superficie ricopre una regione del piano «semplicemente connessa», come si dice in topologia algebrica, e le trasformazioni che essa consente a partire da poligoni curvilinei (del tipo di quelli rappresentati nella figura) formano un gruppo che descrive la geometria di Bolyai e Lobacevskij (una geometria non-euclidea).

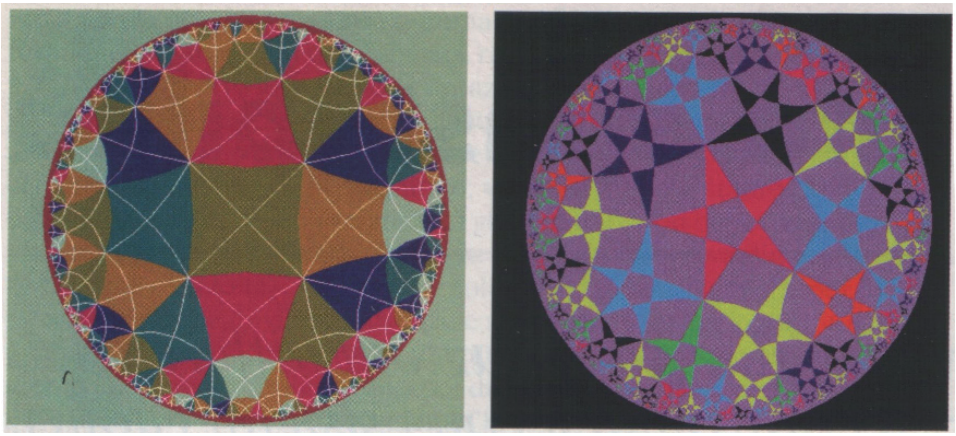


Figura 1 - Poligoni curvilinei.

L'uso di una geometria non-euclidea per risolvere un problema di analisi matematica dimostra come – nell'esperienza concreta dei matematici – le geometrie non-euclidee diventavano strumenti per la generalizzazione dell'analisi: nel quadro di una concezione geometrica dell'analisi i problemi analitici venivano illuminati da intuizioni geometriche che facevano uso di diverse metriche. Poincaré contribuisce quindi in modo efficace all'inserimento delle geometrie non-euclidee in una visione analitica del mondo fisico, meccanicisticamente espresso in equazioni differenziali.

Il tentativo di soluzione del problema dei tre corpi proposto da Poincaré risveglia le inquietudini sulla stabilità del sistema newtoniano. Poincaré si pone una questione apparentemente semplice, più ristretta rispetto al quesito proposto: considerando tre masse di diversa grandezza e supponendo che ognuna delle prime due descriva una

circonferenza intorno al loro comune baricentro e che la terza, priva di massa rispetto alle altre due, si muova nel piano di questa circonferenza, soggetta alla loro attrazione (come nel caso dei satelliti che si muovono intorno a Giove), come si potranno descrivere le orbite rispettive dei tre corpi? Se ne può fornire una descrizione rigorosa nel quadro del sistema newtoniano dell'orbita sulla quale ruota il nostro pianeta, nel contesto delle interazioni gravitazionali con gli altri pianeti del sistema solare?

Poincaré risolve tale «problema ristretto dei tre corpi» muovendo dallo studio delle soluzioni periodiche e facendo uso delle sue ricerche sulle funzioni automorfe. Lo studio dell'evoluzione continua di un sistema dinamico si trasforma così in un problema geometrico: l'analisi di una serie discontinua di punti nel piano. Poincaré proietta quindi il piano su una sfera (il centro della sfera sarà il centro di proiezione): ogni punto del piano è proiettato sulla superficie della sfera in due punti simmetrici rispetto al centro della sfera, mentre la proiezione di una retta è il cerchio massimo. L'analisi di tali «punti singolari» (oggi chiamati «singolarità» o «punti catastrofici») costituisce l'aspetto qualitativo delle soluzioni di un'equazione differenziale che definisce le curve tracciate sul piano suddetto. Tale analisi permette di classificarli come:

- *punti di sella* (attraverso i quali passano due e due sole *caratteristiche*, come Poincaré chiamava le soluzioni dell'equazione relativa alle curve),
- *nodi* (nei quali si interseca una famiglia di infinite curve),
- *fuochi* (attorno ai quali le curve si avvolgono come spirali),
- *centri* (attorno ai quali le curve hanno la forma di cicli chiusi).

Sviluppando un'analogia con le carte topografiche proposta dallo stesso Poincaré si può dire che, considerate le linee di livello, che congiungono punti della stessa altitudine, come curve integrali, ovvero soluzioni di una certa equazione differenziale, i picchi e le valli corrispondono ai *centri* (che tuttavia risultano punti singolari del tutto eccezionali in topologia) e i punti di sella della carta sono i *punti di sella* dell'equazione differenziale; se invece si considerano le linee di pendio al posto delle curve di livello si riconoscono i *nodi*, mentre non possono essere rappresentati i fuochi. La conoscenza del sistema topografico costituito dai «punti singolari» (nelle sue quattro possibilità di convergere verso un nodo, di girare indefinitamente intorno a un fuoco, di avvolgersi asintoticamente attorno a un fuoco, di ritornare al punto di partenza convergendo intorno a un centro) permette di riconoscere tutte le forme delle curve definite da una data equazione differenziale.

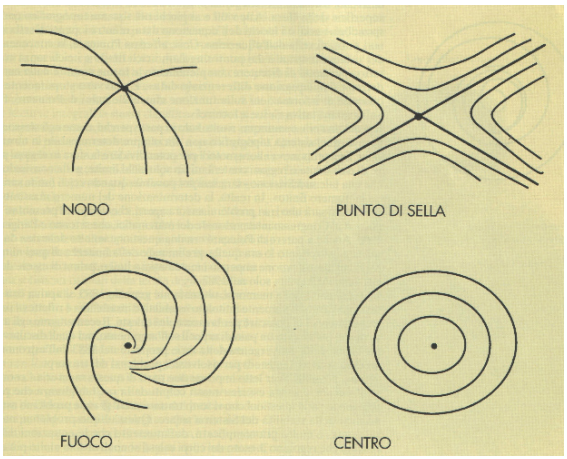


Figura 2 - I quattro punti singolari: nodi, selle, fuochi, centri.

Nel quadro di tale descrizione analitica della topologia algebrica (o *analysis situs*, come veniva allora chiamata) Poincaré dimostra come lo spazio delle posizioni e delle velocità dei tre corpi viene rappresentato da un punto sulla sezione o «piano di Poincaré»: di conseguenza, la successione di punti P_0, P_1, P_2 descrive il comportamento di una traiettoria uscita da P_0; lo studio dei punti di intersezione delle traiettorie con il piano sezione nell'intorno del punto M_0 (fisso perché appartiene a una soluzione periodica) è condotto in analogia con quanto avviene per le soluzioni di un'equazione differenziale del primo ordine nell'intorno dei punti singolari. Nell'analogo dei nodi (topologici) le traiettorie finiranno per avvicinarsi a, o allontanarsi da, C, mentre nell'analogo dei punti di sella alcune traiettorie finiranno per avvicinarsi asintoticamente a C (soluzione asintoticamente periodica), altre si allontaneranno indefinitamente nel futuro e nel passato (soluzione doppiamente asintotica), altre si manterranno a una distanza finita (soluzione periodica).

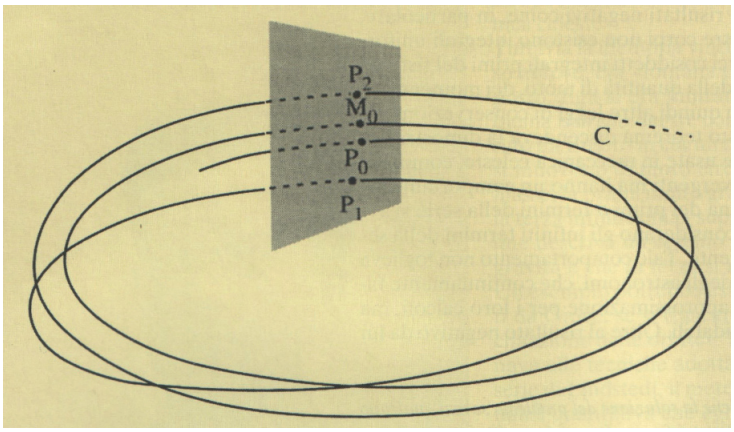


Figura 3 - Traiettorie su un «piano di Poincaré»

La dimostrazione rigorosa del Teorema di ricorrenza[4] definisce la stabilità delle traiettorie, proponendo che infinite soluzioni particolari sono stabili e infinite altre sono instabili.

Studiando le soluzioni periodiche vicine all'instabilità Poincaré si accorge che vi sono soluzioni asintotiche nel futuro (che si avvicinano indefinitamente a C col crescere del tempo e formano una varietà stabile) e soluzioni asintotiche nel passato (che formano una varietà instabile). La scoperta di tali soluzioni doppiamente asintotiche comporta un'elaborazione geometrica estremamente complessa nella quale le superfici S' e S" si tagliano lungo C: tale complessa soluzione geometrica fornisce la prima descrizione di un comportamento caotico in un sistema dinamico.

Viene così, per la prima volta, considerata l'importanza delle condizioni iniziali di un processo in un sistema dinamico e l'esigenza di calcolare esattamente la sua sensibilità alle condizioni iniziali: la teoria dei sistemi dinamici conduce alla nascita della 'geometria' del caos. Oggi si considera *caotico* un sistema dinamico nel quale l'imprecisione con la quale si conosce l'ennesimo termine della serie tende verso l'infinito quando *n* tende all'infinito. Non si può prevedere il comportamento di un tale sistema, in quanto bisognerebbe conoscere il suo stato iniziale con una precisione tanto maggiore quanto è lontano l'orizzonte nel quale si vuole prevedere l'evoluzione del sistema.

Il sistema dinamico caotico fin qui considerato è determinista, ma non è prevedibile. Se ne possono comunque classificare gli stati asintotici (associati a quelli che oggi si chiamano «attrattori strani») e si possono attribuire loro delle probabilità[5].

Soltanto intorno al 1990 si è potuto calcolare con precisione il tempo caratteristico alla fine del quale compare il comportamento caotico dei tre pianeti interni del sistema solare (Terra, Venere, Marte), che va da 10 a 100 milioni di anni: una variazione di un decimiliardesimo nelle condizioni iniziali del loro movimento conduce a due soluzioni che differiscono di un solo miliardesimo dopo 10 milioni di anni, ma del 100% dopo 100 milioni di anni.

Era sconcertante per un fisico-matematico 'classico' quale era ancora Poincaré riconoscere che da un problema di meccanica newtoniana tipicamente deterministico potessero emergere fenomeni caotici, descrivendo rigorosamente l'emergenza di una catena di concatenazioni necessarie a partire da un evento casuale. Lo straordinario viaggio di Poincaré nella complessità delle interazioni delle orbite planetarie conduce alla scoperta di figure di equilibrio e di biforcazione, successivamente studiate nella versione *elementare* della *teoria delle catastrofi*, fondata da René Thom.

Le nuove figure geometriche indagate da Poincaré, come la pseudosfera o il toro, costituiscono oggi le figure di base della geometria contemporanea, come il cubo e il cilindro lo erano per la geometria classica.

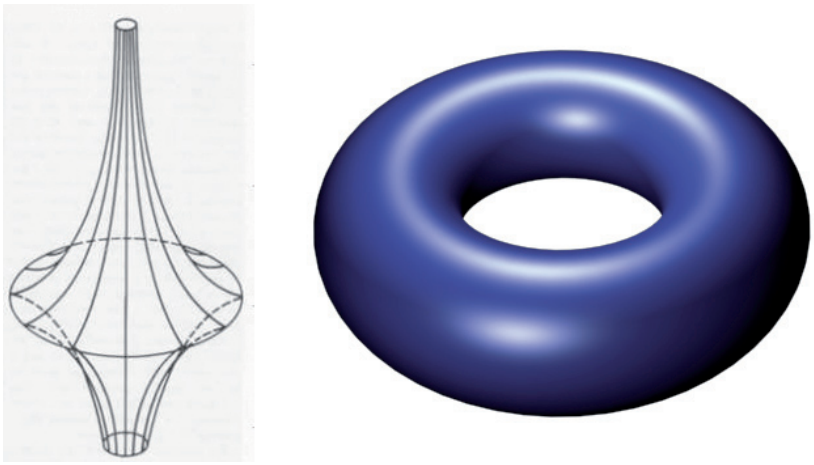


Figura 4 - Pseudosfera e toro.

La pseudosfera è una superficie di rotazione che può essere interpretata come un modello euclideo di geometria non euclidea. Alla superficie Eugenio Beltrami aveva dato il nome di pseudosfera perché ha curvatura costante come una sfera ma di segno negativo. Il toro semplice è una superficie a forma di ciambella. Può essere ottenuta come superficie di rivoluzione, facendo ruotare una circonferenza (la generatrice) intorno a un asse di rotazione, che appartiene allo stesso piano della generatrice, ma che è disgiunto e ortogonale rispetto a questa. Il termine deriva dal latino «torus» che indicava, fra le altre cose, un tipo di cuscino a forma di ciambella.

4. Conseguenze epistemologiche della matematica del «caos»

Quali sono le principali conseguenze epistemologiche ricavabili da queste ricerche fisico-matematiche di Poincaré?

Innanzitutto si dovrà convenire che al di fuori di un insieme discreto di soluzioni periodiche semplici, non esiste in generale una soluzione finitaria effettivamente calcolabile a partire da condizioni iniziali assegnate. Inoltre, la somma dei termini della serie introdotta per approssimare la soluzione, a partire da un certo ordine in poi, si allontana dalla soluzione vera anziché avvicinarsi a essa. L'andamento qualitativo delle traiettorie del sistema, in prossimità di una traiettoria periodica semplice, mostra una transizione continua dal moto regolare e prevedibile della traiettoria periodica di riferimento fino a traiettorie irregolari e caotiche. La caoticità intrinseca nel comportamento di ogni sistema sottoposto all'azione non lineare di forze diventa la norma, mentre la regolarità dei moti dei corpi celesti si rivela un'eccezione. Poincaré ricorda, in definitiva, come da differenze minime nelle condizioni iniziali possono scaturire differenze molto grandi, tali da pregiudicare la stessa possibilità di prevedere l'evoluzione del sistema e da rendere casuale il suo comportamento.

Si tratta della teoria che oggi viene denominata del «caos deterministico» perché i fenomeni possono essere descritti dalle equazioni differenziali della dinamica classica, quelle stesse usate da Laplace e ispirate da Newton; ma la 'determinazione' matematica

di un fenomeno non ne garantisce la predizione (le dinamiche di tali fenomeni appaiono dunque 'caotiche' perché non predicibili). Gli studi topologici sul «caos deterministico» definiscono grandezze matematiche che individuano il tipo di *disordine* che si sta studiando, partendo dall'affermazione (proposta per la prima volta da Poincaré) che i vari tipi di disordine non si possono prevedere, ma si possono descrivere e classificare.

In topologia si rinuncia così alle conoscenze geometriche quantitative, come la lunghezza di una curva o la misura degli angoli di un triangolo, ma si conoscono entità che caratterizzano una struttura, gli invarianti topologici (relativi a nodi, fuochi, punti di sella). Nella meccanica classica si descrivono *traiettorie*, mentre in dinamica del caos si studiano *grovigli* di linee riconoscendone le tipologie. La teoria del caos parte da modelli rigorosamente deterministici, da leggi del moto, e tende a determinare alcune caratteristiche del caos, a trovare un ordine nascosto nel disordine, una «struttura ordinata del disordine». Se Poincaré ha scoperto che dall'ordine deterministico si genera il caos, ora con la dinamica del caos si studiano le forme caotiche che producono ordine (dalle reti neuronali ai flussi di popolazione).

Se si volesse individuare un più ampio senso culturale della svolta avviata da Poincaré si potrebbe confrontare l'immagine del mondo da lui proposta con quella di Laplace. Sul piano storico non sarebbe azzardato stabilire una proporzione secondo la quale Cartesio sta a Leibniz, come Laplace sta a Poincaré. Nell'arco di un secolo si passa infatti da un universo semplice a un universo di contingenze e di cammini inattesi. Al determinismo fisico di Cartesio, e al determinismo cosmico di Laplace, Poincaré contrappone superfici topologiche e fenomeni impredicibili. Inoltre, la vicinanza tra Poincaré e Leibniz può essere confermata dalla bella riflessione contenuta nel *Discorso di metafisica* (1686):

> E se qualcuno tracciasse tutta di seguito una linea che fosse ora diritta, ora circolare, ora di un'altra natura, sarebbe sempre possibile trovare una soluzione o regola o equazione comune a tutti i punti di questa linea, in virtù della quale questi stessi cambiamenti debbano accadere. E non c'è, per esempio, alcun volto, il cui contorno non faccia parte di una linea geometrica, e che non possa essere tracciato, tutto in una volta, con un certo movimento regolare. Ma quando una regola è molto complessa, ciò che le è conforme passa per irregolare [6], p. 11.

Ma le intuizioni di Poincaré sul caos deterministico dovranno aspettare più di cinquant'anni per essere sviluppate. Soltanto a partire dal 1954, grazie agli studi della scuola matematica sovietica di Andrej Kolmogorov e George Birkhoff, e all'uso di algoritmi realizzati con la potenza di calcolo dei computer, il problema dell'imprevedibilità nell'evoluzione di un sistema complesso è diventato oggetto di calcolo.

Con l'avvio alla soluzione del problema dei tre corpi il solido edificio ideale eretto da Newton e Laplace comincia a scuotersi e ha inizio la scienza del XX secolo. La «sezione di Poincaré» cosparsa di punti apparentemente senza relazione è la descrizione

esatta del nostro spazio, dello spazio-tempo in cui siamo immersi: uno spazio-tempo che ospita traiettorie caotiche, rigorose e deterministe, ma imprevedibili.

Con l'informatizzazione delle matematiche la riflessione sul caos dispone oggi di algoritmi potenti e la matematica si apre a un periodo di interazione con le altre scienze inaugurando una nuova area di ricerca – la matematica del caos – che sviluppa le intuizioni di Poincaré: soltanto gli algoritmi dei calcolatori possono esprimere nei dettagli il mondo intravisto da Poincaré, ai limiti possibili della matematica dichiarativa e del suo rigore. Senza il computer le «dinamiche caotiche» non sarebbero state più studiate. E ciò per i caratteri intrinseci ai sistemi computazionali: a) il computer porta nel cuore dell'apparato matematico quel tipo di approssimazione che era emerso negli strumenti di misura; è un esempio applicato di «caos deterministico». Basta chiedere al computer di tenere conto di un decimale in più o in meno perché appaiano soluzioni del tutto diverse; b) il computer può calcolare un'enorme quantità di soluzioni numeriche approssimate a quelle equazioni cui non sappiamo dare una soluzione analitica.

Laplace voleva costruire un apparato matematico che contenesse tutte le variabili che descrivono l'evoluzione nel tempo di un sistema dato, in modo da poter riconoscere lo stato del sistema in qualsiasi istante successivo, un intelletto «che potrebbe abbracciare in un'unica formula tanto il modo dei più diversi corpi dell'universo quanto quello dell'atomo più leggero» [5], pp. 32-33. Poincaré ha intuito che la non-linearità delle equazioni e il caso possono aprire nuove forme di conoscenza («Può infatti accadere che piccole differenze nelle condizioni iniziali producano un errore enorme in quelle successive» [10], p. 50).

In definitiva, le ricerche di Poincaré dimostrano quanto la sua visione fisico-matematica abbia orientato la sua riflessione sulla scienza: concezione geometrica dell'analisi, espressa nell'attitudine a risolvere i problemi analitici tramite intuizioni geometriche; interpretazione unitaria della fisica matematica; attribuzione alla geometria di un ruolo di connessione tra analisi e fisica.

5. Cenni sulle altre concezioni epistemologiche

All'attualità delle ricerche fisico-matematiche di Poincaré va aggiunto anche il rilievo particolarmente fecondo che hanno avuto le altre sue concezioni epistemologiche. Malgrado Poincaré rimanga uno scienziato militante fino al 1912 (l'ultimo articolo viene pubblicato nel marzo del 1912), egli affronta problemi epistemologici già dal 1887 e la sua produzione epistemologica è legata alla sua produzione scientifica. I problemi epistemologici riguardano soprattutto tre ambiti: la riflessione sulla geometria e, in particolare, sul rapporto fra geometria euclidea e geometrie non-euclidee; la riflessione sulla matematica e sui fondamenti della matematica; l'indagine sulle teorie scientifiche.

Si può parlare senz'altro di un'*epistemologia* o di una *filosofia scientifica* di Poincaré, anche se essa non è il risultato di una produzione teorica preordinata, ma di saggi e articoli sparsi, raccolti successivamente nelle sue quattro opere epistemologiche:

La scienza e l'ipotesi (1902); *Il valore della scienza* (1905); *Scienza e metodo* (1908); *Ultimi pensieri* (1913, postuma)[6]. In queste quattro opere è racchiusa quasi tutta la sua produzione epistemologica e filosofica, che si snoda attraverso un percorso che lo porta dalla filosofia della geometria ai fondamenti della matematica e all'epistemologia della scienza in senso più lato.

L'epistemologia matematica di Poincaré si articola in riferimento all'aritmetica e alla geometria. Il principio fondamentale della sua epistemologia aritmetica è il principio di induzione completa, secondo il quale una proprietà vale per *tutti* i numeri naturali quando si verificano simultaneamente le due seguenti condizioni: essa vale per lo zero ed essa vale per il numero $n + 1$ ogniqualvolta vale per il numero n.

Ciò conduce Poincaré a sostenere che la natura del ragionamento matematico è basata su una «regola, inaccessibile alla dimostrazione analitica e all'esperienza», «un vero tipo di giudizio sintetico *a priori*», che è appunto il principio di induzione completa, «l'affermazione di una proprietà dell'intelligenza stessa» [9], pp. 66-67. Poincaré salva così un assunto del kantismo, cioè la possibilità che l'aritmetica venga ricondotta a un assioma che è proprio del nostro intelletto: l'assioma di induzione completa.

Per la geometria, l'algebra e l'analisi, gli assiomi di riferimento sono quelli che definiscono il concetto di gruppo («Fra le parole che hanno esercitato l'influenza più felice [in matematica], segnalerò *gruppo* e *invariante*» [10], p. 27). La teoria dei «gruppi di trasformazioni» sostiene che, a partire dalle operazioni di un certo gruppo, si possono costruire delle geometrie *caratterizzate* dalle proprietà invarianti delle figure rispetto al gruppo di trasformazioni scelto. La geometria viene così ancorata all'algebra e all'analisi e fa da tramite tra matematica e fisica[7].

La possibilità di un numero variabile di dimensioni nello spazio poggia sul continuo matematico: vi sono quindi varie geometrie possibili. Il concetto di gruppo è innato nella mente, ma non lo è una particolare geometria (come quella euclidea). Il concetto matematico di «gruppo di trasformazioni» può consentire di dare un fondamento virtuale 'innato' allo spazio geometrico.

Il matematico costruisce la sua geometria come un ingegnere, a partire però da una struttura potenziale dell'intelletto che è propria di tutti gli uomini. La creatività del matematico risiede nella capacità di costruire teorie nuove, a partire da quella struttura, cioè, da un gruppo di trasformazioni. Ma il gruppo di trasformazioni che costituisce la geometria euclidea è il più semplice perché applicabile ai movimenti fisici dei corpi solidi ordinari, su scala mesoscopica.

È appena il caso di ricordare che proprio lo studio dei gruppi di trasformazioni aveva permesso a Poincaré (come si è visto) di stabilire un diretto rapporto tra continuo geometrico e fisico e di fondare la topologia algebrica. Si potrebbe dire che la sua epistemologia geometrica viene smentita dalle sue ricerche di topologia algebrica che – oltrepassando la contrapposizione tra geometria euclidea e non euclidea – aprono alla visione degli spazi complessi.

Gli assiomi di induzione completa e di gruppo sono costitutivi da un lato

dell'aritmetica e dall'altro, dell'analisi e della geometria. In questo modo Poincaré si muove all'interno di una prospettiva ancora kantiana. In un certo senso, si può dire che questi assiomi prendono il posto delle categorie della kantiana analitica trascendentale (mentre per Kant il fondamento dell'aritmetica e della geometria risiedeva nelle intuizioni a priori di spazio e tempo dell'estetica trascendentale), anche se Poincaré introduce un elemento di convenzionalità, con l'affermazione che c'è una libertà costruttiva del matematico che, partendo da questi assiomi, può creare, ad esempio, diverse geometrie non euclidee.

In definitiva, esiste per Poincaré un'oggettività scientifica, anche se si tratta di un'oggettività che non si fonda sulla conoscenza di un singolo fatto, del dato sperimentale preso in sé (che chiama «fatto bruto»), ma sulla conoscenza del sistema di relazioni che regola i dati sperimentali. Questo sistema di relazioni per Poincaré è sostanzialmente costruito dalla matematica. In tale oggettività risiede il valore della scienza (*La valeur de la science* è stato un libro molto letto, anche fuori dalla Francia, è stato il primo *bestseller* di letteratura scientifica), perché la scienza possiede la capacità di pervenire a un sistema di conoscenze oggettive sulle relazioni dei fenomeni e questa capacità è ciò che la distingue da altri linguaggi, da altre forme di creatività.

Poincaré non è un convenzionalista estremo o radicale come volevano alcuni interpreti. Sostanzialmente, le tesi di Poincaré sono contrarie all'empirismo e al positivismo e risentono di un kantismo abbastanza diffuso nella cultura francese di fine Ottocento e di inizio Novecento. Esse ebbero un largo influsso nella riflessione novecentesca sulla scienza.

È interessante ricordare, al proposito, che *La valeur de la science* fu, fuori della Francia, il punto di coagulo dell'empirismo logico. Sappiamo che la prima fase dell'empirismo logico risale al 1907, quando, a Vienna, giovani studiosi come Otto Neurath, Hans Hahn e Philip Frank si ritrovano a discutere dei problemi legati alla fondazione delle scienze e leggono *La valeur de la science* e le altre opere epistemologiche di Poincaré, insieme a quelle di altri grandi scienziati come Ernst Mach. Frank, uno dei primi protagonisti dell'empirismo logico, sosterrà che l'empirismo logico ha composto insieme, il principio di economia machiano e il costruttivismo convenzionale di Poincaré:

> Mi accorsi ben presto che qualsiasi problema nella filosofia della scienza doveva consistere nella elaborazione di una teoria, in cui le idee di Mach e Poincaré fossero due aspetti speciali di una visione più generale. Per compendiare queste due teorie in una sola frase, si potrebbe dire che secondo Mach i principi scientifici generali sono descrizioni economiche abbreviate di fatti osservati; secondo Poincaré sono libere creazioni della mente umana che non dicono nulla intorno ai fatti osservati. Il tentativo di integrare i due concetti in un sistema coerente fu l'origine di ciò che più tardi venne definito empirismo logico … [3], p. 26.

In altri termini, Poincaré viene visto come uno dei padri fondatori dell'empirismo

logico.

Spero di aver fornito utili elementi per comprendere l'importanza del pensiero di Poincaré oggi, sia sul piano matematico, che su quello epistemologico, e per invitare a una lettura dell'opera dell'«ultimo grande scienziato universale» (J. Vuillemin).

NOTE

[1] Intuitivamente una superficie è semplicemente connessa nel caso in cui ogni curva chiusa tracciata sulla superficie può essere deformata con continuità fino a ridursi a un punto.

[2] Una tra le presentazioni divulgative più esaurienti della vita e dell'itinerario di ricerca di Poincaré in [1].

[3] La commissione giudicatrice internazionale era composta da tre matematici di grande momento: Gösta Mittag-Leffler di Stoccolma, Karl Wierstrass di Berlino ed Charles Hermite di Parigi. Un'accurata presentazione del problema e delle soluzioni offerte da Poincaré si trova in [13], pp. VII-L.

[4] Secondo il teorema di ricorrenza per ogni regione dello spazio, comunque piccola, ci sono traiettorie che l'attraversano un'infinità di volte, di modo che in qualche tempo futuro, e per un'infinità di volte, il sistema ritornerà arbitrariamente vicino alla sua situazione iniziale.

[5] Un esempio di sistema dinamico caotico è il movimento di un dado, che è imprevedibile, ma le cui posizioni all'infinito sono le sei facce del dado stesso, i sei «attrattori strani» del sistema, a ciascuno dei quali si può attribuire una probabilità di 1/6.

[6] Su questi aspetti cfr. anche [2] e [15].

[7] «Sembra che la geometria non possa contenere niente che non sia già contenuto nell'algebra o nell'analisi; che cioè i fatti geometrici non siano altro che fatti algebrici o analitici espressi in un altro linguaggio» [10], p. 31.

Bibliografia

[1] Bottazzini, U., Poincaré: il cervello delle scienze razionali, *Le Scienze*, II, n. 7, febbraio 1999.

[2] Fortino, M., *Convenzione e razionalità scientifica in Henri Poincaré*, Rubbettino, Soveria Mannelli 1997.

[3] Frank, Ph., *La scienza moderna e la sua filosofia* (1961), a cura di M. C. Galavotti, il Mulino, Bologna 1973.

[4] Koyré, A., *Dal mondo chiuso all'universo infinito* (1957), Feltrinelli, Milano 1979[3] (prima ed. it. 1970).

[5] Laplace de, P. S., *Essai philosophique sur les probabilités* (1825), Ch. Bourgois, Paris 1986.

[6] Leibniz, G. W., *Discorso di metafisica* (1686), a cura di A. Sani, La Nuova Italia, Scandicci (FI) 1992.

[7] Parisi, G., *La chiave, la luce e l'ubriaco. Come si muove una ricerca scientifica*, Di Rienzo, Roma 2006.

[8] Poincaré, J. - H., *Œuvres*, 11 voll., Gauthier-Villars, Paris 1916-1956.

[9] Poincaré, H., *La scienza e l'ipotesi*, in Id., *Opere epistemologiche*, a cura di G. Boniolo, Piovan Ed., Abano Terme 1989, vol. I, pp. 51-234.

[10] Poincaré, H., *Scienza e metodo*, in Id., *Opere epistemologiche*, a cura di G. Boniolo, Piovan Ed., Abano Terme 1989, vol. II, pp. 5-197.

[11] Poincaré, J. H., *Scritti di fisica-matematica*, a cura di U. Sanzo, UTET, Torino 1993.

[12] Poincaré, J. H., *Il valore della scienza*, a cura di G. Polizzi, La Nuova Italia, Scandicci (Firenze) 1994.

[13] Poincaré, H., *Geometria e caso. Scritti di matematica e fisica*, a cura di C. Bertocci, Bollati Boringhieri, Torino 1995.

[14] Poincaré, H., *La scienza e l'ipotesi*, a cura di C. Sinigaglia, Bompiani, Milano 2003.

[15] Sanzo, U., *Poincaré e i filosofi*, Milella, Lecce 2000.

DIDATTICA E COMUNICAZIONE SCIENTIFICA

Insegnare geometria

Vinicio Villani

Dipartimento di Matematica 'L. Tonelli', Università di Pisa

Ho accettato ben volentieri l'invito a questo incontro, poiché già da parecchi anni vado riflettendo sui molteplici problemi dell'insegnamento-apprendimento della geometria, a tutti i livelli scolastici. Devo però riconoscere che il titolo del seminario[1] è decisamente troppo perentorio e ambizioso, anche perché la mia esperienza diretta d'insegnamento della geometria si è svolta tutta, salvo sporadiche eccezioni, in ambito universitario (corsi di didattica della matematica e preparazione dei nuovi insegnanti in ambito SSIS). Ragione in più per apprezzare l'occasione che l'odierno incontro mi offre per un confronto di idee e di esperienze con le colleghe e i colleghi qui presenti, impegnati in svariati tipi di scuole preuniversitarie.E ringrazio fin d'ora tutti i partecipanti all'incontro per i contributi che essi daranno alla discussione prevista al termine di questa mia relazione.

Un ringraziamento specifico agli organizzatori e in particolare alla prof.ssa Silvia Dentella che, nella sua presentazione introduttiva, ha voluto esprimere un apprezzamento benevolo (forse troppo benevolo) per la mia ormai ultra-trentennale produzione scientifico-didattica.

Naturalmente lo spazio di un seminario non consente di affrontare in tutta la sua complessità un tema tanto vasto e articolato qual è quello dell'insegnamento-apprendimento della geometria: basti pensare alla pluralità e all'eterogeneità dei percorsi e degli obiettivi formativi delineati nei programmi ministeriali che si sono succeduti nel tempo in Italia, come del resto anche in tutti gli altri Paesi nei quali la geometria ha giocato e gioca tuttora un ruolo importante. Mi limiterò quindi ad esprimere le mie opinioni (spesso in controtendenza rispetto a quelle oggi alla moda) su quattro aspetti specifici:

1. L'insegnamento 'a spirale'.
2. Il 'fusionismo' tra geometria del piano e geometria dello spazio.
3. Il ruolo dei problemi.
4. Il raccordo con altre discipline.

Per chi fosse interessato ad ulteriori approfondimenti rinvio alla bibliografia posta alla fine della relazione.

1. L'insegnamento 'a spirale'

Una caratteristica peculiare della geometria sta nell'intreccio tra aspetti figurali e aspetti concettuali. La scuola non può ignorare l'immediatezza della percezione visiva già ben sviluppata fin dalla prima infanzia, ma deve assolvere anche al non facile compito di strutturare progressivamente le esperienze sensoriali degli allievi in un quadro di riferimento globale e coerente. Data la complessità di questo compito, il buon senso degli insegnanti, la graduale maturazione individuale degli allievi e un gran numero di ricerche internazionali suggeriscono concordemente l'esigenza di un percorso didattico per l'apprendimento della geometria articolato «a spirale» su vari livelli, a partire dalla scuola dell'infanzia ed esteso a tutti gli ordini scolastici successivi. Per evitare che la 'spirale' degeneri in una stanca ripetitività, è indispensabile che nel passaggio da un livello al successivo si verifichi un salto di qualità, non tanto nei contenuti quanto nella loro strutturazione disciplinare.

Una presentazione particolarmente accurata di una siffatta articolazione in livelli è quella dovuta ai coniugi van Hiele (vedi per esempio il § 2 di [4]). Dalle ricerche di van Hiele risulta in particolare che:

- Per poter accedere fruttuosamente ad un dato livello è necessaria una buona padronanza dei livelli precedenti (ciò fornisce, tra l'altro, una spiegazione in chiave didattica del fallimento della cosiddetta «matematica moderna» che qualche decennio fa veniva inflitta ad allievi impreparati a recepirla).
- La maturità degli allievi per passare da un livello al successivo non dipende solo dall'età anagrafica ma anche dal contesto socio-culturale e didattico nel quale l'apprendimento ha luogo (e ciò evidenzia il ruolo cruciale della scuola nel processo di acculturazione geometrica).

Poiché ad una lettura superficiale queste considerazioni possono apparire ovvie, reputo opportuno segnalare un paio di implicazioni didattiche tutt'altro che ovvie, che ne conseguono.

In primo luogo, l'importanza di accertare con cura le conoscenze, competenze e abilità geometriche acquisite (o non acquisite) dai singoli allievi e dalla classe nel suo complesso ai livelli precedenti, prima di passare ad un livello successivo. Fino a non molti anni fa c'erano insegnanti (anche universitari) che all'inizio di un nuovo ciclo si sentivano autorizzati a marcare la frattura con i cicli precedenti con proclami del tipo: «Dimenticate tutto quello che vi è stato insegnato finora; adesso si ricomincia daccapo». Al giorno d'oggi presumo che fortunatamente ciò non accada più.

Trovo però ancora inadeguato il metodo burocratico tuttora in uso, di somministrare un generico test iniziale seguito da un frettoloso ripasso (che annoia chi quelle cose le sapeva già e che non è sufficiente a rimuovere le lacune di chi non le sapeva). Concluso questo 'rito' l'insegnante inizia il nuovo programma seguendo pedissequamente la scansione dei capitoli e dei paragrafi del libro di testo.

L'alternativa che io prediligo è invece quella di iniziare il nuovo ciclo con una franca

discussione, con partecipazione attiva di tutti gli allievi, per individuare un nucleo di «conoscenze condivise dalla classe» da assumere come punto di partenza per lo sviluppo del programma del nuovo ciclo. All'obiezione (fondata) che questa ricognizione preliminare richiede parecchio tempo rispondo con profonda convinzione che si tratta di tempo ben speso. Per esempio all'inizio di una scuola secondaria superiore tali «conoscenze condivise dalla classe» potranno includere, oltre alla nomenclatura geometrica di base, il postulato delle parallele, i tre criteri di uguaglianza dei triangoli, il fatto che la somma degli angoli interni di un triangolo è un angolo piatto, la disuguaglianza triangolare, l'enunciato del teorema di Pitagora, ...). E il nuovo insegnamento potrà iniziare proprio da qui, assumendo questo insieme di «conoscenze condivise dalla classe» come punto di partenza per dedurne, con brevi catene di ragionamenti, altre proprietà geometriche non scontate e magari sorprendenti, quali l'esistenza dei quattro punti notevoli dei triangoli o l'incommensurabilità tra diagonale e lato di un quadrato, ecc.

Mi aspetto ora una nuova obiezione: «Ma così facendo si rinuncia alla sistematicità dell'esposizione e alla sequenzialità del libro di testo (che inizia con richiami di logica, nozioni e notazioni insiemistiche, postulati della geometria, definizioni, dimostrazioni non-intuitive di fatti geometrici intuitivamente evidenti, ...)». Anche a questa ulteriore obiezione replico con profonda convinzione che solo in una fase successiva di revisione critica gli allievi saranno maturi per comprendere ed apprezzare l'esigenza di risalire dalle «conoscenze condivise dalla classe» ad un elenco di fatti geometrici basilari non dimostrati, e quindi al complesso dei postulati «ufficiali» della geometria (quelli elencati in bell'ordine nelle pagine iniziali del libro di testo). In tutto ciò non vi è nulla di rivoluzionario: anche storicamente nello sviluppo della geometria greca sono venuti prima alcuni importanti teoremi (basti pensare a Talete e a Pitagora) e solo dopo un paio di secoli la sistemazione teorica di Euclide, seguita a distanza di ben due millenni dalla revisione critica di Hilbert ...

Come seconda implicazione didattica collegata alle riflessioni precedenti segnalo l'incompatibilità tra un insegnamento 'a spirale' del tipo qui descritto e la recente moda di parcellizzare tutta la matematica scolastica, e quindi in particolare anche la geometria, in unità didattiche autonome e slegate tra loro. Andrebbe invece valorizzato un aspetto culturale particolarmente rilevante e di segno opposto, vale a dire il ruolo della memoria a lungo termine su alcuni (pochi) fatti essenziali, abbinato alla capacità di saper reperire autonomamente sui libri di testo o sui propri appunti le informazioni necessarie per comprendere una dimostrazione o per risolvere un problema.

2. Il 'fusionismo' tra geometria del piano e geometria dello spazio

Le prime esperienze geometriche dei bambini in età prescolare riguardano figure tridimensionali quali dadi, scatole, palline, palloni, barattoli. Solo in un secondo momento la loro attenzione si rivolge alle forme delle superfici che delimitano tali solidi (quadrati, rettangoli, cerchi).

Mi piace ricordare in proposito che già vent'anni fa, nel redigere un opuscolo

destinato ad un corso di aggiornamento per insegnanti della scuola di base (vedi [5]), avevamo scelto un titolo inusuale: *La geometria: dallo spazio al piano*. Ciò non voleva essere una provocazione, quanto piuttosto un modo per attirare l'attenzione dei lettori su una situazione di fatto troppo spesso trascurata nella prassi scolastica.

Nel passare dalle scuole materne ed elementari alle medie, alle superiori (e all'università) l'attenzione verso la geometria dello spazio si affievolisce vieppiù, col risultato di una sua pressoché totale emarginazione. Eppure la grande importanza di questa parte della geometria è riconosciuta (a parole) dagli estensori dei programmi d'insegnamento, dagli autori dei libri di testo, dalla maggior parte degli insegnanti!

A pseudo-giustificazione di questa estromissione della geometria tridimensionale si adducono esigenze di sistematicità (viene prima la geometria del piano e solo successivamente quella dello spazio) nonché motivi pratici e organizzativi, ampiezza dei programmi, eccessiva difficoltà, ecc. La situazione doveva essere insoddisfacente già agli inizi del Novecento, e non solo in Italia, visto che da parte di autorevoli matematici (tra cui in prima linea Felix Klein) fu elaborato un programma, detto «fusionista», col proposito di insegnare in parallelo la geometria del piano e quella dello spazio. Il successo del programma «fusionista» fu abbastanza effimero e ben presto si tornò alla scansione tradizionale, rinviando lo studio della geometria dello spazio ad un momento successivo al completamento dello studio della geometria del piano (ossia al 'giorno del mai').

Sono ben consapevole dell'impossibilità di riproporre nella nostra attuale realtà scolastica un programma dichiaratamente fusionista. Ciò che invece reputo opportuno e realisticamente praticabile è una specie di «fusionismo attenuato».

Per esempio, nelle scuole secondarie superiori non costerebbe molta fatica inserire nel tradizionale insegnamento-apprendimento della geometria del piano qualche occasionale confronto con le corrispondenti situazioni della geometria dello spazio, situazioni che si possono presumere intuitivamente note dal precedente ciclo degli studi nella scuola media o che comunque l'insegnante di scuola superiore potrebbe richiamare brevemente (e in termini solo intuitivi) al momento stesso del confronto tra piano e spazio. Nell'anno scolastico successivo andrebbe poi trovata una collocazione adeguata per un sia pur breve ciclo di lezioni sulla geometria dello spazio e a quel momento sarebbe opportuno ricordare nuovamente, a ruoli invertiti, le analogie e le differenze tra le situazioni che si presentano nella geometria tridimensionale e le corrispondenti situazioni della geometria bidimensionale.

Ecco alcuni esempi di questo 'fusionismo attenuato':

- Individuazione di analogie e differenze tra le definizioni e le proprietà del parallelismo e della perpendicolarità nel piano e nello spazio.
- Costruzione di una tabella per confrontare le formule per il calcolo delle aree di figure piane (triangoli, quadrati, cerchi,...) e le formule per il calcolo dei volumi delle omologhe figure solide (piramidi, cubi, sfere,...).

- Consapevolezza del fatto che se una figura (del piano o dello spazio) viene modificata per effetto di una similitudine di fattore k: le ampiezze angolari restano tutte invariate, le lunghezze si modificano tutte secondo il fattore moltiplicativo k, le aree si modificano tutte secondo il fattore moltiplicativo k, i volumi si modificano tutti secondo il fattore moltiplicativo k.
- Riflessione sulla rigidità (o non rigidità) delle figure geometriche: i triangoli sono figure 'rigide' del piano (terzo criterio di uguaglianza), i quadrati non sono 'rigidi'. Analogamente, i tetraedri sono figure 'rigide' dello spazio, i cubi non sono 'rigidi'.

In questo ordine di idee, una riflessione a mio parere interessante riguarda la formula di Erone che, com'è ben noto, consente il calcolo delle aree dei triangoli in funzione delle lunghezze dei lati. Poiché l'esistenza di una formula siffatta è strettamente collegata alla rigidità della figura, appare naturale congetturare l'esistenza di una formula analoga per il calcolo dei volumi dei tetraedri in funzione delle lunghezze degli spigoli. Sorprendentemente invece, questa congettura si rivela falsa (cfr. per esempio il §16 di [4]).

3. Il ruolo dei problemi

Come già accennato nel §1, nel nostro Paese l'insegnamento tradizionale della geometria tende, almeno dalla scuola media in poi, ad una crescente sistematicità che privilegia gli aspetti teorici rispetto a quelli di «scoperta guidata» e di *problem solving*. Agli allievi si chiede di studiare (a memoria?) le definizioni, gli enunciati e le dimostrazioni dei principali teoremi. Vengono poi proposti esercizi strettamente collegati alla parte teorica, nel senso che la strategia risolutiva è di fatto predeterminata da un «contratto didattico» implicito in base al quale l'allievo sa già a priori che ogni esercizio relativo ad un dato capitolo ammette un'unica soluzione a cui egli dovrà tentare di pervenire sfruttando uno o più risultati teorici esposti in quello stesso capitolo. In altri Paesi prevale invece un'impostazione pragmatica, basata su un coinvolgimento più attivo degli allievi, ai quali si chiede di formulare essi stessi qualche definizione, di congetturare l'enunciato di qualche teorema partendo da osservazioni empiriche e dall'esame di qualche caso particolare, di scegliere le strategie risolutive degli esercizi e dei problemi proposti (non necessariamente tutti a soluzione unica).

Entrambi questi approcci presentano lati positivi e limiti.

Nell'impossibilità di entrare in questa sede in maggiori dettagli, mi limito a presentare alcuni esempi di situazioni problematiche che considero particolarmente formative e che possono essere affrontate anche nell'ambito di un insegnamento prevalentemente teorico, fin dalla scuola media o all'inizio della scuola secondaria superiore. È sottinteso che le attività qui di seguito proposte comportano momenti di lavoro individuale, o a piccoli gruppi, e momenti di discussione collettiva con partecipazione attiva di tutti gli allievi.

Situazione problematica 1
(Padronanza linguistica)

Date una definizione di «triangolo» (la stessa consegna può essere ripetuta per altre figure geometriche ben note, quali segmenti, angoli, parallelogrammi, cerchi, cubi, prismi, sfere, relazione di parallelismo nel piano e nello spazio, ecc.).

Commento. Un confronto tra le formulazioni date dai singoli allievi dovrebbe consentire di giungere ad una o più definizioni accettate da tutta la classe. A questo punto sarà giunto il momento di stabilire un confronto con le definizioni reperibili nei libri di testo, o sui vocabolari.

L'obiettivo didattico specifico di quesiti di questo tipo è quello di far toccare con mano la difficoltà e l'importanza di saper caratterizzare con parole chiare e univoche enti geometrici intuitivamente ben noti. Ciò favorirà l'acquisizione di una padronanza linguistica nell'ambito specifico della geometria, ma spendibile anche, ben al di là della sola geometria, nella vita adulta quotidiana e professionale.

E sempre in tema di padronanza linguistica, ecco un altro quesito, questa volta a risposta multipla, finalizzato ad accertare la capacità degli allievi di utilizzare correttamente connettivi e quantificatori.

Situazione problematica 2
(Argomentare e ragionare correttamente)

Quesito. Un poligono si dice regolare quando ha tutti i lati e tutti gli angoli uguali. Pertanto un poligono è irregolare (= non regolare) quando ha:

1. tutti i lati e tutti gli angoli fra loro disuguali;
2. tutti gli angoli uguali ma i lati disuguali oppure tutti i lati uguali ma gli angoli disuguali;
3. almeno una coppia di lati disuguali e almeno una coppia di angoli disuguali;
4. almeno una coppia di lati disuguali oppure almeno una coppia di angoli disuguali.

Commento. In un'indagine di qualche anno fa (vedi [1], p. 28) solo il 31% degli studenti del primo anno di varie scuole superiori della Toscana ha saputo dare la risposta corretta d. Aspetto particolarmente preoccupante se si tiene conto che messaggi pubblicitari, promesse dei politici in campagna elettorale, contratti di assicurazione, ecc. giocano spesso su fraintendimenti logico-linguistici di questo tipo per far sembrare le loro offerte più allettanti di quanto non lo siano realmente.

Situazione problematica 3
(La formula per il calcolo del volume di una piramide)

Premessa. Si consideri un cubo con spigolo di lunghezza s.

Congiungendo il centro O del cubo con i suoi otto vertici si vengono a formare sei piramidi uguali tra loro. Poiché il volume del cubo è dato dalla formula $V(\text{cubo}) = s^3$,

ciascuna delle sei piramidi avrà volume

$$(*)\ V(\textit{piramide}) = s^3/6$$

D'altra parte ciascuna piramide ha area di base $A = s^2$ e altezza $h=s/2$. Sostituendo queste espressioni in (*) si perviene alla formula

$$(**)\ V(\textit{piramide}) = \frac{Ah}{3}$$

Quesito. In base a quanto visto nella premessa è lecito concludere che la formula (**) è valida per ogni piramide?

Commento. La risposta è ovviamente negativa. Nondimeno questo caso particolare ci fornisce un'informazione importante: Ammessa l'esistenza di una formula che consente di esprimere il volume di una piramide in termini della sua altezza e dell'area della sua base, tale formula non può essere altro che la (**).

Situazione problematica 4
(Sviluppi del cubo)

Lo sviluppo 'a croce' di un cubo è ben noto. Esistono altri sviluppi? Quanti sono? Tra tutti gli sviluppi possibili, ve n'è qualcuno che presenta vantaggi (o svantaggi) rispetto a quello 'a croce'?

Commento. Si tratta di una proposta di lavoro intesa a coinvolgere tutti gli allievi di una classe in una ricerca comune, concettualmente semplice ma operativamente impegnativa, visto che si tratta di esaminare attentamente una quantità notevole di casi, vedi per esempio [5].

Dopo aver ben compreso i termini del problema, gli allievi constateranno che gli eventuali ulteriori sviluppi devono essere un sottoinsieme dell'insieme di tutte le sestine di quadrati (uguali tra loro) opportunamente affiancati. Presumibilmente, dopo avere effettuato alcuni tentativi disordinati, gli allievi si troveranno costretti a seguire una strategia sistematica per disegnare tutte le possibili sestine e per identificare successivamente quelle che consentono una ricostruzione del cubo mediante incollamento delle coppie di lati dei quadrati destinati a formare uno spigolo del cubo.

La determinazione di tutte le possibili sestine non presenta particolari difficoltà concettuali, ma è alquanto laboriosa dato il loro numero elevato. Converrà quindi procedere per gradi, iniziando dalle possibili configurazioni che si possono ottenere affiancando dapprima solo due quadrati, poi tre, quattro, cinque e infine sei. Chiaramente nel caso di due soli quadrati affiancati c'è un'unica configurazione possibile. Aggiungendo un terzo quadrato ai primi due si possono formare due configurazioni distinte. Aggiungendo un quarto quadrato a ciascuna delle due configurazioni formate da tre quadrati se ne possono ottenere cinque. Ma è probabile che a questo punto qualche allievo affermi che ne esiste anche qualcun'altra (speculare rispetto ad una delle cinque).

Il docente potrà cogliere questo spunto per dirimere la questione, ricordando

che per convenzione in geometria si considerano uguali anche due figure speculari, a differenza della convenzione in uso in altri ambiti (per esempio nel nostro alfabeto, dove *b* , *d* , *p* , *q* sono da considerarsi lettere diverse).

Procedendo alla stessa maniera si costruiranno tutte le configurazioni realizzabili con cinque quadrati e infine tutte quelle realizzabili con sei quadrati.

Per decidere se una di queste sestine consente una ricostruzione del cubo, converrà usare matite colorate per identificare con uno stesso colore le coppie di lati liberi che nella ricostruzione vanno a formare uno spigolo del costruendo cubo. Altra ottima occasione per saggiare la capacità degli allievi di decidere mediante una riflessione mentale se la ricostruzione 'chiude' o se il procedimento si blocca ad un certo punto.

Per farla breve, si troveranno gli undici sviluppi del cubo disegnati in figura.

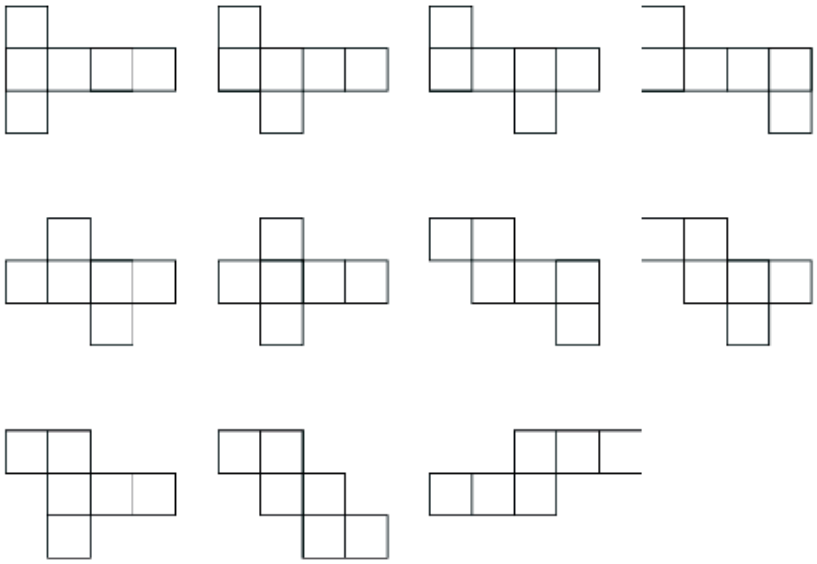


Figura 1 - Gli 11 sviluppi del cubo.

La formulazione dell'ultima domanda del problema è intenzionalmente molto generica. Nel proporla avevo in mente un'ipotetica realizzazione industriale di scatole cubiche, ottenute ritagliandone gli sviluppi piani da un rotolo di cartone di larghezza costante e di lunghezza pressoché illimitata. Si constata facilmente che nel caso dei due sviluppi disegnati nella figura in basso a destra lo spreco di materiale è praticamente nullo, in quanto entrambi questi sviluppi «piastrellano» una striscia illimitata (nonché tutto il piano).

Una possibile variante di questa situazione problematica è quella dello studio degli sviluppi piani di scatole con spigoli di lunghezze diverse (parallelepipedi rettangoli).

Questo quesito mi sembra utile, tra l'altro, per sfatare l'opinione diffusa tra i nostri allievi che un quesito matematico, o lo si sa risolvere in pochi minuti, o non lo si sa risolvere affatto. E, anche in questo caso, la valenza di un allenamento alla sistematicità nell'affrontare un problema complesso va ben al di là della geometria, e riguarda moltissime situazioni della vita professionale in tutti i campi.

Situazione problematica 5
(Geodetiche su superfici dello spazio)

Si chiede di caratterizzare i percorsi minimi tra due punti A, B situati sulla superficie di un cubo, di un cilindro, di un cono, di una sfera.

Commento. Nel caso dei cubi, dei cilindri e dei coni conviene passare ai rispettivi sviluppi piani (che si possono realizzare con opportuni tagli, senza modificare le proprietà metriche delle superfici in esame. Nel caso della superficie sferica ciò non è possibile. Semplici considerazioni sperimentali consentono tuttavia di rendere plausibile la risposta corretta: i percorsi più brevi sono quelli sulle circonferenze massime passanti per i due punti (e scegliendo, tra i due archi di estremi A e B, quello minore, vedi il §22 di [4]).

L'aspetto più interessante di questa situazione problematica sta nel fatto che l'introduzione del termine «geodetica» per caratterizzare le linee che minimizzano (almeno localmente) le lunghezze dei percorsi tra due punti di una superficie accomuna le rette del piano e le circonferenze massime della sfera. Ciò consente di considerare la sfera come un modello fisicamente realizzabile e intuitivamente comprensibile di una geometria «non euclidea».

Gli allievi potranno essere dunque coinvolti nella costruzione di una tabella comparativa tra la geometria euclidea del piano e la geometria della sfera.

	PIANO	SFERA
Elementi costitutivi	I punti del piano.	I punti della superficie sferica.
Linee geodetiche	Il cammino più breve tra due punti è un segmento di retta.	Il cammino più breve tra due punti è il minore dei due archi di circonferenza massima.
Relazioni di collegamento	Per due punti passa un'unica geodetica.	Per due punti non antipodali passa un'unica geodetica; per due punti antipodali ne passano infinite.
Relazioni di partizione	(I) Due punti di una geodetica dividono la geodetica in tre parti, due delle quali illimitate. (II) Ogni geodetica divide il piano in due parti simmetriche (semipiani).	(I) Due punti di una geodetica dividono la geodetica in due parti, entrambe limitate. (II) Ogni geodetica divide la superficie sferica in due parti simmetriche (semisfere).
Parallelismo	Per ogni punto P del piano esterno ad una geodetica r esiste un'unica geodetica passante per P e disgiunta da r.	Dato un punto P nella superficie sferica esterno ad una geodetica γ non esiste alcuna geodetica passante per P e disgiunta da γ.
Somma delle ampiezze angolari dei triangoli	La somma degli angoli interni di un triangolo è sempre un angolo piatto π.	La somma σ degli angoli interni di un triangolo sferico T è sempre maggiore di un angolo piatto π, e più precisamente la differenza $\sigma - \pi$ è proporzionale all'area di T.
Similitudini	Per ogni numero reale $k > 0$ esistono similitudini di rapporto k.	Le uniche similitudini sono le isometrie, ossia le similitudini di rapporto $k = 1$.

Figura 2 - Proprietà geometriche del piano e della sfera a confronto.

4. Il raccordo con altre discipline

La geometria interagisce direttamente o indirettamente con molte altre discipline scolastiche. Mi sembra quindi un vero peccato che tali legami non vengano adeguatamente valorizzati dagli insegnanti di matematica, ove possibile in collaborazione con i colleghi delle discipline coinvolte.

Ecco, in estrema sintesi, qualche esempio in proposito, proponibile a livello di scuola media e superiore:

a. Geometria e lingua

- Abituare gli allievi ad esporre sempre in modo linguisticamente chiaro e corretto i ragionamenti fatti per giungere alla soluzione di un esercizio o di un problema.
- Saper utilizzare correttamente i connettivi e i quantificatori.
- Concordare con l'insegnante di lettere una riflessione comune (linguistica e matematica) su qualche breve brano di grandi pensatori del passato quali Platone (penso per esempio al dialogo di Socrate con lo schiavo di Menone sulla duplicazione del quadrato) o Galileo (penso per esempio al famoso brano tratto dal Saggiatore: «La filosofia è scritta in questo grandissimo libro ... io dico l'universo ... Egli è scritto in lingua matematica e i caratteri sono triangoli, cerchi e altre figure geometriche...»).

b. Geometria e storia, storia dell'arte, filosofia

- Inquadrare storicamente le principali tappe della geometria nella cultura scientifica e filosofica dell'epoca: Talete, Pitagora, Euclide, Cartesio, Kant, Hilbert e la crisi dei fondamenti, ...
- Collegare gli aspetti matematici delle trasformazioni geometriche con le ricerche dei pittori di epoca rinascimentale sulle leggi della visione prospettica (Piero della Francesca, L. B. Alberti, A. Dürer, ...). (cfr. per esempio i §§18 e 19 di [4]).

c. Geometria e geografia, astronomia

- Evidenziare il ruolo fondamentale della geometria per la determinazione delle dimensioni della Terra (Eratostene) e delle distanze Terra-Luna, Terra-Sole.
- Mettere a confronto i diversi tipi di carte geografiche dal punto di vista delle loro proprietà matematiche (carte geodetiche, equivalenti, conformi, lossodromiche) con riferimento ai rispettivi ambiti di utilizzo. (cfr. per esempio il §22 di [4]).

d. Geometria e tecnologia

- Ruolo della riga e del compasso nella geometria classica e uso moderno di opportuno software geometrico.

- Curve geometriche e loro realizzazioni meccaniche. Penso per esempio alla bellissima mostra «Oltre il compasso» realizzata circa quindici anni fa dal collega e amico Franco Conti, purtroppo prematuramente scomparso.

La mostra è attualmente visitabile a Firenze nel Museo per la Matematica (Il Giardino di Archimede) diretto da Enrico Giusti. Anche in varie altre città italiane (per esempio, a Milano, Modena, Trieste) si trovano mostre matematiche interessanti che possono contribuire validamente a far apprezzare la bellezza della geometria e il suo ruolo fondamentale nei più svariati settori delle attività umane.

e. Geometria, fisica, chimica

- Problemi di minimo percorso dei raggi luminosi.
- Classificazione dei cristalli rispetto alle loro simmetrie.
- Rappresentazione tridimensionale delle strutture molecolari.

5. Riflessioni conclusive

Fra i temi che non ho potuto affrontare in questa relazione per mancanza di tempo, ne segnalo tre, che considero particolarmente rilevanti:

- Una riflessione sulle finalità culturali e applicative dell'insegnamento della geometria nei vari tipi delle nostre scuole secondarie, e sulla coerenza (o non-coerenza) tra le finalità dichiarate e la prassi didattica corrente (vedi per esempio [2]).
- Un confronto fra la tradizione italiana dell'insegnamento della geometria, di impostazione sostanzialmente euclidea, e altri possibili approcci, basati per esempio sul metodo delle trasformazioni geometriche (vedi [3]).
- Una discussione sui pregi e sugli inconvenienti di un'introduzione più precoce e più sistematica della geometria analitica nonché delle strutture vettoriali, a scapito della geometria sintetica. (vedi per esempio [2]).

NOTE

[1] Il seminario per insegnanti 'Insegnare geometria' si è svolto a Pisa, il giorno 30 ottobre 2006, nell'ambito di Pianeta Galileo.

BIBLIOGRAFIA

[1] MA-LI (Matematica e Lingua), *Tra numeri e parole. Ricerca dell'IRRSAE Toscana sul passaggio tra la Scuola Secondaria di primo grado e quella di secondo grado*, a cura di F. De Michele, L. Nuti, V. Villani Le Monnier, Firenze 1999.

[2] Villani V., L'insegnamento preuniversitario della geometria: molte domande, qualche risposta, *L'insegnamento della matematica e delle scienze integrate*, 17 A, 5 (1994) pp. 439-457.

[3] Villani V., Le trasformazioni geometriche nella scuola secondaria superiore, *L'insegnamento della matematica e delle scienze integrate*, 18 A, 6 (1995) pp. 669-688.

[4] Villani V., *Cominciamo dal punto – Domande, risposte e commenti per saperne di più sui perché della matematica: Geometria*, Pitagora ed., Firenze 2006.

[5] Villani V., Sainati Nello M., Sciolis Marino, M. *La geometria: dallo spazio al piano*, Quaderno CNR n.2. Seminario Didattico del Dipartimento di Matematica, Università di Pisa, Pisa 1985.

L'innovazione dell'insegnamento scientifico nella scuola secondaria superiore: il caso della chimica

Carlo Fiorentini

Presidente CIDI, Firenze

1. Introduzione

Nella scuola secondaria superiore riteniamo sia necessario il passaggio da un approccio integrato predisciplinare, caratteristico della scuola primaria e della scuola secondaria di primo grado, ad un'impostazione disciplinare, ma non ovviamente nel significato usuale del termine. Il curricolo della biologia, della chimica, della fisica, ecc., presente generalmente nella scuola secondaria superiore, costituisce infatti un tentativo di bignamizzazione di primo e secondo livello (a seconda che ci si riferisca al triennio o al biennio) del curricolo universitario di queste discipline nella loro versione base, quella che viene affrontata nei primi esami.

Quando i manuali di riferimento sono fatti bene, ci troviamo effettivamente di fronte ad esempi di struttura specialistica della disciplina. In un manuale spesso di un migliaio di pagine sono riassunti in un modo formalmente ineccepibile e gerarchicamente organizzato a partire dalle teorie e dai principi di carattere più generale, i campi fondamentali della chimica, della fisica, della biologia, l'enciclopedia organizzata delle loro conoscenze fondamentali. All'interno di ciascun corso universitario, essi verranno poi effettivamente compresi grazie all'effettuazione di molti esami di carattere più specialistico, molti dei quali corrispondono ad uno o ad alcuni capitoli del manuale «generale». Questi manuali generali hanno, tuttavia, indubbiamente un significato, sia nella formazione di specialisti, che di per sé, come strumenti di consultazione per specialisti, di fronte alla sempre più accentuata difficoltà di comunicazione tra loro. Averli, invece, proposti come modello della formazione disciplinare nella scuola secondaria superiore costituisce un esempio emblematico dell'esito fallimentare della non comprensione della differenza radicale tra specialismo e cultura scolastica.

A differenza della scuola di base, nella scuola secondaria l'obiettivo fondamentale è indubbiamente la comprensione di alcune grandi teorie scientifiche, quali ad esempio i principi della meccanica, la teoria dell'evoluzione, le leggi classiche della chimica, ecc.. Ma queste, o altre significative teorie possono essere comprese non con un'impostazione assiomatica, enciclopedica ed addestrativa. Per comprenderle sono necessari tempi molto lunghi, un'attenzione al linguaggio, al rigore scientifico, agli ostacoli epistemologici. Possono essere comprese soltanto all'interno di un'impostazione problematica, quale può essere garantita dalla loro contestualizzazione. Per un non esperto, il significato

di un concetto non è ricavabile da relazioni logiche all'interno di un'organizzazione deduttiva, a partire da concetti e teorie ancora più generali, di cui sfugge a maggior ragione il significato.

È fondamentale l'utilizzo della riflessione storico-epistemologica, e non ovviamente per sostituire uno specialismo con altri specialismi, per sostituire ad esempio la fisica con la storia o la filosofia della fisica. L'obiettivo è quello di far comprendere alcuni concetti e teorie fondamentali della scienza moderna, che sono state inventate da grandi scienziati, da geni dell'umanità, con procedimenti non induttivi. Essi sono stati capaci di formulare congetture che, pur essendo in contraddizione con i dati percettivi e con le teorie fino ad allora consolidate, hanno permesso contemporaneamente di risolvere problemi ed anomalie presenti nelle vecchie teorie e di rendere possibile lo sviluppo delle conoscenze scientifiche. Senza la ricostruzione didattica di questo contesto problematico, i concetti e le teorie sono per lo studente senza significato, rimangono delle mere definizioni verbali, senza vita.

I concetti non escono bell'e pronti come Minerva dalla testa di Zeus. I concetti scientifici più significativi, che si sviluppano a volte in modo lineare, ma il più delle volte attraverso rotture e scarti, sono caratterizzati da un complesso di significati che non possono essere colti dall'accostamento delle varie definizioni. Generalmente, la formulazione più matura di un concetto potrà essere compresa per approssimazioni successive a partire da definizioni meno complesse dal punto di vista della formalizzazione. Considerazioni simili si possono effettuare da un versante non epistemologico, ma psicopedagogico.

Infine, anche nella scuola secondaria, il problema della quantità dei contenuti, o meglio della loro estensione, diventa fondamentale. Va ribaltata la logica usuale, per cui il modello specialistico di curricolo, indicato precedentemente, viene più o meno bignamizzato a seconda delle ore e degli anni a disposizione. Il quadro orario di ciascuna disciplina nel corso degli anni della scuola secondaria deve costituire il punto di partenza delle scelte curricolari. Esse dovranno essere più o meno radicali, in relazione all'estensione dei contenuti, se una data disciplina sarà presente in un indirizzo soltanto un paio di anni, due ore alla settimana, o tutti e cinque gli anni. Prendendo come esempio l'insegnamento della chimica, nel primo caso potranno essere affrontate, a nostro parere, soltanto le teorie della chimica classica, come mostreremo nella seconda parte di questo contributo.

2. La fondamentale importanza della scelta dei contenuti

La scelta dei contenuti adatti a ciascun grado di scolarità è, a nostro parere, il maggior nodo irrisolto dell'insegnamento scientifico, anzi esso non è mai stato nella sostanza seriamente affrontato. Quali le cause?

Esse sono molteplici e sono sostanzialmente riconducibili alla logica specialistica che ha sempre improntato l'insegnamento scientifico in Italia. Tuttavia occorre riconoscere che anche l'attivismo ha delle responsabilità. In relazione a questo ultimo aspetto ci

sembrano interessanti le riflessioni critiche rivolte a Dewey da Lydia Tornatore, la pedagogista che negli ultimi decenni ha maggiormente contribuito ad evidenziare i molti aspetti ancora oggi illuminanti del pensiero deweyiano:

> Malgrado l'opposizione deweyana ad ogni separazione tra forma e contenuto, per questa via la separazione riaffiora, e si pongono le basi di un nuovo formalismo, per il quale la razionalità si identifica con il controllo che trova espressione nel metodo. Di qui il rischio di quella valorizzazione esclusiva del metodo affiancata da scarsa attenzione ai contenuti che ha spesso caratterizzato la pedagogia della scienza di ispirazione deweyana, costituendone uno dei più appariscenti limiti [10].

Vi è, tuttavia, un'immane difficoltà: la scelta di contenuti adeguati è, a nostro parere, possibile soltanto quando si realizza la collaborazione delle competenze specialistiche di tre settori totalmente separati nella tradizione accademica italiana, *quello disciplinare specifico (biologia, chimica, fisica, ecc.), quello psicopedagogico e quello storico-epistemologico*. Indubbiamente in altri paesi la situazione è migliore che in Italia; vi è una maggiore consapevolezza dell'importanza delle didattiche disciplinari: è sufficiente ricordare tutti i progetti di insegnamento scientifico che sono stati finanziati sia negli USA che in Inghilterra durante gli anni sessanta, dopo la conferenza di Wood Hole. Tuttavia anche la maggior parte di questi progetti, che hanno coinvolto scienziati, pedagogisti e psicologi, hanno avuto il grande limite della mancanza di significative competenze storico epistemologiche.

La pedagogia e la psicologia dell'apprendimento sono indispensabili per impostare in modo adeguato l'insegnamento scientifico, ma pensiamo che da sole non siano in grado di farlo: senza la mediazione della riflessione storico-epistemologica, rischiano di rimanere due mondi incomunicabili il mondo delle esigenze educative e dell'apprendimento da una parte, e quello della scienza, con i suoi sofisticati formalismi, dall'altra.



Soltanto la riflessione storico-epistemologica può permettere effettivamente la realizzazione di esigenze psicopedagogiche fondamentali, quali l'individuazione, per ciascuna disciplina, dei concetti basilari, dei metodi caratteristici, dei prerequisiti – non arbitrari o semplicemente linguistici – dei diversi concetti, della gerarchia concettuale, ecc., cioè di proposte di curricolo verticale che non siano più la riproposizione di ciò che si verifica oggi nella maggioranza delle situazioni, in cui il curricolo verticale consiste nella ripetizione ossessiva, ma insignificante sul piano cognitivo, del manuale

universitario, nei vari cicli scolastici, con l'unica variante della semplificazione e della banalizzazione.

3. Il dogmatismo dell'insegnamento scientifico manualistico

Watkins osserva che il libro di Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche,* contiene nella scelta del linguaggio molti suggerimenti, alcuni espliciti, altri impliciti, di un significativo parallelismo tra la scienza, in special modo la scienza normale, e la teologia. Kuhn scrive dell'educazione scientifica come di un «processo di iniziazione professionale» che «prepara lo studente a diventare membro della particolare comunità scientifica» [11, p. 102].

Kuhn aveva infatti sottolineato il carattere essenzialmente dogmatico dell'insegnamento scientifico, indicandone contemporaneamente l'aspetto funzionale al proseguimento della ricerca normale: «si tratta di un'educazione rigida e limitata, forse più rigida e limitata di ogni altro tipo di educazione, fatta eccezione per la teologia ortodossa. Ma per la ricerca all'interno della scienza normale, per risolvere rompicapo all'interno della tradizione definita dai manuali, lo scienziato viene preparato quasi alla perfezione» [3, p. 199].

Questa formazione universitaria è stata in Italia negli ultimi decenni ancora più assurda in quanto la maggior parte dei laureati hanno avuto come sbocco l'insegnamento nella scuola secondaria di primo e secondo grado senza nessun altro tipo di formazione iniziale. Si tratta di un insegnamento basato sulla retorica delle conclusioni. «Essa viene infatti insegnata quasi come un assoluta *retorica delle conclusioni,* nella quale le temporanee e provvisorie costruzioni del sapere scientifico sono rappresentate come verità di fatto, letteralmente irrevocabili. Per quanto riguarda la fase iniziale della ricerca, la scoperta dei principi direttivi, l'espediente più comune è l'assoluto silenzio» [8, p. 50].

I risultati di questo modo di intendere l'insegnamento scientifico, se sono insignificanti sul terreno specifico della formazione scientifica delle giovani generazioni – come testimoniano le innumerevoli ricerche sulle concezioni degli studenti di cui abbiamo già parlato in precedenti puntate –, sono addirittura nefasti su un piano formativo generale:

> Si pensi ad uno studente che sia stato convinto che la scienza consiste di verità immutabili. Cinque o dieci anni dopo aver conseguito la laurea, scopre che molte nozioni che gli furono insegnate come vere non lo sono più, né vengono più accettate come sapere, perché sono state superate e rimpiazzate da altre formule. Impreparato a questi cambiamenti, inconsapevole delle operazioni di ricerca che li producono, l'ex studente, ora cittadino elettore, non può fare altro che dubitare della attendibilità del suo libro di testo e del suo insegnante. In un gran numero di casi, il dubbio, che ha colpito il libro di testo e l'insegnante, viene ad investire la stessa scienza e la stessa competenza professionale in generale. L'ex studente non ha altra via che abbandonarsi ad un relativismo e a un cinismo pericolosi» [8, p. 75].

Questa concezione dell'insegnamento scientifico poteva avere una giustificazione culturale durante l'Ottocento, finché fu generalmente condivisa una visione della scienza di tipo dogmatico. Da molto tempo ormai il clima culturale è diverso; da alcuni decenni il confronto avviene tra posizioni simili a quelle, da una parte, di Popper e di Geymonat, e dall'altra di Kuhn e di Rorty. Sono concezioni diverse, ma che hanno, tuttavia, in comune la concezione della scienza come un sistema in continua trasformazione, dove è fondamentale comprendere la relatività dei concetti scientifici, e quindi la loro genesi e la loro evoluzione, dove è fondamentale il confronto tra teorie diverse.

Infine, la metodologia prevalente dell'insegnamento scientifico può avere un'altra motivazione, di matrice idealistica, cioè, la visione della scienza non come cultura, ma come armamentario utile per la società, per lo sviluppo economico, e tanto più utile quanto più aggiornato è sul piano tecnico: in questa prospettiva non importa che ciò che si studia abbia significato per lo studente; ciò che interessa è soltanto l'utilizzo strumentale delle nozioni apprese.

4. Un esempio: il rinnovamento del curricolo della chimica

Le conoscenze chimiche fanno riferimento essenzialmente a 4 ambiti: l'ambito dei fenomeni, l'ambito delle leggi macroscopiche, quello dei modelli microscopici ed infine quello del linguaggio chimico. La nostra proposta pedagogico-didattica di insegnamento della chimica nella scuola preuniversitaria attribuisce un ordine di tipo psicologico ai primi tre ambiti, e considera invece l'ambito del linguaggio chimico trasversale a tutte tre:

1. fenomeni chimici (concetti operativi)
2. concetti, leggi e teorie macroscopiche (chimica classica)
3. modelli e teorie microscopiche (chimica classica e chimica del Novecento)

} LINGUAGGIO CHIMICO

Riteniamo, cioè, che, mentre nella scuola di base debba essere affrontato il primo aspetto all'interno di una generale impostazione fenomenologica-operativa dell'educazione scientifica, nel biennio della scuola secondaria superiore sia possibile affrontare i concetti e le teorie della chimica classica, e nel triennio, in stretta connessione con l'acquisizione delle necessarie conoscenze fisiche, i modelli e le teorie microscopiche della chimica del Novecento. Siamo ovviamente consapevoli che le relazioni tra i tre ambiti siano molto più complesse, che, ad esempio, molti fenomeni siano diventati tali in connessione all'invenzione di ipotesi che fanno riferimento o alla chimica classica o alla chimica del Novecento. Conseguentemente i fenomeni che potranno essere affrontati con un'impostazione fenomenologica-operativa non potranno essere individuati casualmente (si cadrebbe in questo modo nell'induttivismo più cieco) ma soltanto attraverso una riflessione di tipo storico-epistemologico. Questa necessaria precisazione sulla non linearità delle connessioni tra i quattro aspetti fondamentali delle conoscenze chimiche non può portare, tuttavia, alla loro sovrapposizione casuale, o alla sostanziale eliminazione dei primi due aspetti, con la riduzione dell'insegnamento

della chimica agli ultimi due, quello dei modelli microscopici novecenteschi e del linguaggio chimico.

Comprendiamo le motivazioni socio-culturali di questa scelta: la chimica, come d'altra parte tutte le discipline scientifiche, ha una collocazione marginale nel curricolo, ed un ruolo essenzialmente informativo più che formativo: dovrebbe fornire in un arco temporale limitato (generalmente alcune ore alla settimana nell'arco di due anni) nozioni sull'enciclopedia delle conoscenze chimiche oggi accreditate. Se questa impostazione poteva avere un senso in una scuola elitaria e selettiva, da alcuni decenni le ricerche sui risultati di questa impostazione dell'insegnamento hanno mostrato la drammaticità della situazione, sia in relazione alla capacità di stimolare interessi e motivazioni che ai risultati cognitivi. Infatti, per la grande maggioranza degli studenti la chimica, come viene generalmente insegnata (cioè, per loro la chimica), appare come una materia incomprensibile, astrusa, senza significato.

Siamo nel regno della più raffinata astrazione e formalizzazione. La chimica del Novecento ha realizzato il sogno riduzionista sette-ottocentesco di assumere finalmente una forma simile a quella della fisica, di ricondurre quella disciplina contaminata per lungo tempo dall'empiria, dalle qualità secondarie dei materiali e delle sostanze, alla dignità scientifica della fisica, con i suoi eleganti formalismi e con il suo potente apparato matematico. La chimica del Novecento è finalmente diventata una disciplina caratterizzata da un'organizzazione deduttiva che ha il suo punto di partenza, i suoi assiomi, in un insieme di concetti che si riferiscono agli atomi e alle molecole e che è poi in grado di fornire spiegazioni di una molteplicità di fenomeni chimici che erano stati scoperti nel periodo della chimica classica.

Ma tutto ciò può avere per una qualsiasi persona significato soltanto se ella ha, da una parte, una grande padronanza delle teorie e dei linguaggi della fisica – che costituiscono prerequisiti dei concetti più strettamente chimici – e dall'altra, una conoscenza significativa delle problematiche fenomenologiche e teoriche di carattere macroscopico che si vuole con i modelli microscopici spiegare. Un qualsiasi manuale che si rispetti – qualcuno potrebbe obiettare – ricostruisce in alcuni capitoli l'insieme delle teorie e dei concetti fisici sulla struttura dell'atomo che sono poi necessari per la chimica. Questi capitoli costituiscono, a nostro parere, uno dei primi esempi di totale inconsapevolezza pedagogica di questi manuali: diventa, infatti la proposta didattica di iniziazione alla chimica, indifferentemente per studenti del biennio o del triennio, la bignamizzazione di un corpo complesso di conoscenze fisiche, che potrebbe eventualmente avere un senso soltanto in un manuale universitario, quello, cioè, di schematizzare in alcune centinaia di pagine le conoscenze fisiche che si suppone che lo studente abbia già acquisito dalla scuola secondaria superiore o in specifici esamini universitari di fisica.

La chimica del Novecento presuppone uno studente che abbia delle basi significative in tutti i campi della fisica, dalla meccanica alla termodinamica, dall'elettromagnetismo alla fisica quantistica; presuppone, cioè, uno studente che abbia nel corso di molti

anni costruito delle conoscenze solide su teorie e concetti molto complessi e pieni di ostacoli epistemologici. Prendiamo un esempio, apparentemente tra i più banali per come è affrontato nei manuali, il passaggio dal modello atomico di Rutherford a quello di Bohr. La storiellina che viene raccontata è più o meno di questo tipo: l'ipotesi di Rutherford venne immediatamente criticata perché, alla luce delle leggi dell'elettromagnetismo, un oggetto carico in moto circolare perde costantemente energia, e conseguentemente l'elettrone non potrebbe rimanere nella sua orbita ma cadrebbe sul nucleo. Bohr, alcuni anni dopo, superò queste contraddizioni ipotizzando che le leggi della fisica classica non si applicassero all'infinitamente piccolo, all'atomo, e postulò conseguentemente i principi della meccanica quantistica: 1) quando un atomo non perde né acquista energia, l'elettrone si trova in un orbita definita, 2) un elettrone non può occupare tutte le zone dello spazio, ma può transitare solo in alcune orbite, emettendo o acquistando una precisa quantità di energia. Questa è una delle storielline che si possono memorizzare più facilmente, ma che significato può avere per chi, e a maggior ragione per uno studente di 15-16 anni, non abbia conoscenze significative di fisica?

Queste conoscenze fisiche mancano a tutti gli studenti della scuola secondaria superiore con l'eccezione del liceo scientifico e degli indirizzi sperimentali dove la fisica viene affrontata nell'arco di tre o più anni. Ma generalmente anche in questi casi più felici la chimica viene insegnata al 3° o al 4° anno quando lo sviluppo delle conoscenze fisiche è, se va bene, a metà del cammino. Tuttavia queste conoscenze fisiche non sarebbero ancora sufficienti per dare significato ai concetti chimici ed al linguaggio chimico del Novecento senza una significativa conoscenza da parte degli studenti di alcune importanti classi di sostanze e trasformazioni chimiche e delle leggi macroscopiche fondamentali.

Il linguaggio chimico costituisce una della grandi conquiste intellettuali dell'umanità. In tutti i libri di chimica, scritti nelle varie lingue della Terra, vi è una parte comune a tutti, universale, quella che si riferisce ai nomi delle sostanze (formule chimiche) e quella che schematizza le trasformazioni chimiche (le equazioni chimiche). È un linguaggio convenzionale indubbiamente, ma non nello stesso senso del linguaggio ordinario. È un linguaggio che è in grado di fornire informazioni qualitative e quantitative della composizione molecolare delle sostanze e delle trasformazioni chimiche. Ma è pedagogicamente assurdo pensare di dare significato al linguaggio chimico con un insegnamento che fin dall'inizio si sviluppi solo attraverso nomi, formule ed equazioni. Sono queste conoscenze molto sofisticate, che possono avere significato solo se gli studenti hanno avuto, nell'arco di molti anni, a partire dalla scuola elementare fino al biennio, una lunga dimestichezza con sostanze, trasformazioni chimiche e le leggi macroscopiche della chimica classica.

Per esempio, il bilanciamento delle ossido-riduzioni ha rappresentato nella evoluzione della chimica una grande conquista intellettuale e costituisce da molto tempo uno strumento fondamentale nell'analisi quantitativa delle sostanze ossidanti e

riducenti. Come è generalmente insegnato, costituisce, invece, un'attività da settimana enigmistica che rappresenta un incubo per gli studenti, fin quando non abbiano memorizzato e non si siano sufficientemente addestrati alle regole del gioco.

Il prototipo dell'insegnamento usuale della chimica è l'insegnamento grammaticale come poteva essere praticato 50 anni fa, insegnamento che era basato sull'illusione che l'acquisizione e la padronanza del linguaggio potesse avvenire soltanto attraverso lo studio di principi, regole e definizioni. Se la via grammaticalista alla comprensione e alla padronanza linguistica è stata da molto tempo mostrata assurda pedagogicamente, a maggior ragione dovrebbe apparire chiaramente l'assurdità per le conoscenze chimiche, che sono, come tutte le conoscenze scientifiche, generalmente molto più complesse sul piano psicologico del linguaggio comune, essendo esse spesso epistemologicamente in discontinuità con la razionalità della vita quotidiana.

5. Fenomenologia chimica e l'educazione scientifica nella scuola di base

Le problematiche chimiche sono strettamente interrelate alla storia dell'umanità. L'invenzione o la scoperta di nuove tecniche ha portato spesso all'affinamento di fondamentali conoscenze fenomenologiche di tipo chimico. È sufficiente ricordare nell'antichità il perfezionamento delle tecniche della combustione e la possibilità di ricavare materiali artificiali così importanti nell'evoluzione della civiltà umana, quali i metalli, i leganti, i materiali laterizi, ecc.; il fuoco è stato per tempi immemorabili il principale strumento utilizzato dall'uomo per realizzare trasformazioni chimiche. Durante il Medioevo furono scoperte delle sostanze, gli acidi minerali, che, grazie alla loro capacità aggressiva (erano, cioè, capaci di sciogliere solidi insolubili in acqua), furono in grado di permettere lo sviluppo di un nuovo campo di fenomeni chimici.

A metà del Settecento la chimica era da tempo caratterizzata da un rigoglioso sviluppo quantitativo: le sostanze naturali ed artificiali conosciute aumentavano costantemente e diventava sempre più problematico classificarle anche a causa dei limiti intrinseci al linguaggio chimico allora utilizzato che attribuiva i nomi alle sostanze sulla base di molteplici criteri casuali, quali il loro colore, sapore, utilizzo, luogo di provenienza, nome dello scopritore, ecc..

Nella prima metà del Settecento, come d'altra parte era successo nei secoli precedenti, vennero, inoltre, elaborate molteplici teorie che si proponevano di fornire delle spiegazioni e di individuare delle connessioni e delle regolarità in questo mare buio di fenomeni empirici; ma lo sviluppo scientifico successivo della chimica mostrò che i principi fondamentali delle trasformazioni chimiche potevano essere rintracciati con un approccio sostanzialmente opposto a quello allora prevalente, con un'impostazione cioè di tipo quantitativo.

«Ma che grande scoperta» potrebbe dire il riduzionista di turno: «l'approccio quantitativo è ciò che caratterizza il pensiero scientifico». Ora, a parte la discutibilità di un'affermazione generale di questo tipo, essa è comunque facile a dirsi, ma tutt'altro che a farsi. Anche per la chimica il passaggio alla maturità si realizzò con la sua

matematizzazione, con l'individuazione di principi quantitativi; ma prima delle geniali scoperte di Lavoisier quale era la situazione? Tutti i grandi chimici del Settecento si erano convinti che la forza della chimica risiedesse nella sua metodologia specifica, di tipo sperimentale e qualitativo e non nell'utilizzo di metodologie fisiche, cioè quantitative. Erano stati, infatti, effettuati molti tentativi di conferire alla chimica un assetto quantitativo simile a quello della meccanica newtoniana, con l'introduzione, ad esempio del principio delle affinità chimiche mutuato dal principio della gravitazione universale [9]. Tuttavia, tutte queste concezioni banalmente riduzioniste non avevano minimamente contribuito allo sviluppo della chimica.

Le trasformazioni chimiche erano state fino a Lavoisier osservate e studiate nelle loro regolarità di tipo qualitativo e già questo aspetto aveva costituito un'impresa titanica. Non è un caso che la chimica sia stata associata fino ad alcuni secoli fa con la magia. Le trasformazioni chimiche sono in un certo senso delle magie: sono, infatti quei fenomeni i cui da determinate sostanze se ne ottengono altre che non hanno nessuna proprietà in comune con quelle iniziali. Lo sviluppo della chimica, nella così detta fase prescientifica rappresenta un fenomeno prodigioso; durante il Seicento ed il Settecento si riuscì ad individuare, a partire dal caos della materia indistinta presente nella vita quotidiana, un numero immenso di materiali e di sostanze naturali od artificiali, e successivamente classi di sostanze e relazioni tra esse. E non è che non fossero state osservate anche delle regolarità quantitative da parte degli artigiani quando utilizzavano determinate trasformazioni chimiche per fabbricare materiali o sostanze utili per i vari scopi.

La situazione psicologica del non esperto di fronte al mondo dei materiali, delle sostanze e delle trasformazioni non è molto diversa da quella dello scienziato o dell'artigiano di 4-5 secoli fa. Se si vuole costruire delle conoscenze che siano in consonanza con le strutture cognitive dello studente e con il suo mondo percettivo occorre dedicare gli anni della scuola di base a realizzare questo passaggio graduale dalla materia indistinta della percezione quotidiana all'individuazione *di* alcuni materiali, di alcune sostanze e di alcune classi di sostanze, cfr. [1].

6. Le leggi macroscopiche della chimica

Perché le leggi macroscopiche della chimica (e più in generale la chimica classica) devono costituire la parte principale dell'insegnamento della chimica nell'area comune della scuola secondaria superiore? Innanzitutto, perché costituiscono *conoscenze fondamentali della chimica*. L'oblio, negli ultimi decenni, di questo aspetto costituisce una delle manifestazioni più eclatanti del pensiero riduzionista. In secondo luogo, *perché realizzano un passaggio graduale* (che permette di comprendere il significato dei concetti*) dalle concezioni di senso comune agli asp*etti *più formalizzati della chimica*. Questa seconda risposta è determinante sul piano pedagogico-didattico. L'importanza disciplinare di determinate problematiche costituisce, infatti, una condizione necessaria, ma tutt'altro che sufficiente per il loro inserimento nel curricolo.

A differenza dei concetti operativi di tipo fenomenologico, i concetti e le leggi

macroscopiche della chimica non sono, tuttavia, in continuità con il senso comune: molte di esse sono in stretto rapporto con esperimenti che è possibile (che è didatticamente indispensabile) effettuare, ma non sono leggi di tipo induttivo; sono, invece, il frutto di atti creativi di grandi scienziati che hanno saputo inventare delle ipotesi che andavano molto oltre i dati dell'osservazione. Le leggi fondamentali della chimica non possono essere insegnate conseguentemente con l'impostazione operativa proposta per la scuola di base. Si cadrebbe in questo modo nell'impostazione angusta dell'attivismo e dello sperimentalismo ingenuo. Le osservazioni sperimentali non possono più, di per sé, essere la base per la realizzazione della concettualizzazione. La loro funzione è ora radicalmente diversa: continuano ad essere necessarie per l'ampliamento del riferimento empirico e quindi della conoscenza di sostanze e trasformazioni; sono, inoltre, indispensabili per esplicitare le percezioni e le conoscenze degli studenti nei confronti di fenomenologie che storicamente hanno svolto un ruolo determinante nella creazione di concetti e leggi fondamentali.

Nuovi concetti o leggi hanno permesso di risolvere problemi teorico e/o sperimentali, hanno costituito la risposta a contraddizioni esistenti nelle teorie precedenti, sono state in grado di individuare regolarità impreviste, e fornire spiegazioni e di prevedere nuovi fenomeni. Tutti questi aspetti contribuiscono a costituire il significato dei concetti, significato che non risiede nella loro definizione formale, acontestuale, tranne che per gli specialisti che sono in grado di dominare cognitivamente l'organizzazione assiomatica di una disciplina.

Affinché lo studente possa comprendere concetti e leggi della chimica classica è quindi necessario ricostruire il contesto problematico, teorico e sperimentale, in cui essi sono stati ipotizzati e poi definiti formalmente.

La formalizzazione, a questo punto diventa fondamentale. Se già nella scuola di base l'importanza delle osservazioni sperimentali risiede nel costituire la base della concettualizzazione di fenomenologie elementari – cioè, della formalizzazione possibile – a maggior ragione nella scuola secondaria superiore la formalizzazione non può che avere un'importanza centrale, in relazione, ovviamente, ai quei concetti fondamentali della chimica di cui è stato possibile comprendere il significato problematico e contestuale. La nostra critica radicale non è quindi rivolta alle definizioni, al linguaggio rigoroso ed alla necessità didattica di esercizi di addestramento, ma ad un insegnamento che, invece di considerare questi come punti di arrivo, si fonda solo su di essi, presumendo che lo studente possa comprenderli in quanto gli viene mostrato come ricavarli logicamente all'interno dell'organizzazione deduttiva della chimica.

7. I concetti fondamentali della chimica

Durante il Settecento nasce lo studio dello stato gassoso, che si popola man mano di gas che hanno la caratteristica di essere chimicamente attivi. Questo concetto costituisce un'altra rottura epistemologica, perché il prototipo dei gas, l'aria, era nel Sei-Settecento concepito come chimicamente non attivo. La chimica delle arie rappresentò

la condizione necessaria, seppur non sufficiente, della scoperta geniale dei principi della chimica, avvenuta negli ultimi decenni del Settecento per opera di Lavoisier.

Anche i bambini di 7-8 anni sanno che l'aria è fatta di ossigeno ed azoto. E probabilmente risponderebbero, osservando la candela che si spenge sotto una campana di vetro, con il pre-giudizio del consumo di ossigeno. Inoltre precocemente viene loro insegnato che dalla combustione e dalla respirazione si produce anidride carbonica ed acqua, e che per fortuna esiste nelle piante la fotosintesi clorofilliana che utilizza la scarto della combustione, l'anidride carbonica, per produrre ciò che permette loro di vivere e di svilupparsi.

Questi sono indubbiamente fenomeni di grandissima rilevanza, ed è una preoccupazione educativa condivisibile quella che essi siano conosciuti da tutti gli studenti. Quindi, a maggior ragione, essi non devono essere trattati come barzellette: non sono, infatti, fenomeni che possano essere direttamente osservati; ma possono essere compresi soltanto all'interno di quadri teorici troppo complessi per la scuola di base.

Provate con studenti di 14-15 anni, ed anche con studenti di 18-19 anni, iscritti nelle varie facoltà universitarie, a verificare, effettuando esperimenti di combustione, che cosa pensano che succeda. Molteplici ricerche testimoniano anche in questo caso l'inconsistenza dell'insegnamento scientifico formale prematuro e la persistenza di concezioni prelavoisieriane: le combustioni sarebbero quelle trasformazioni in cui certi materiali, consumandosi, producono luce calore. Le combustioni avverrebbero quindi con sparizione di materia e con consistente diminuzione di peso. Anche in questo caso, *l'apparenza viene presa come realtà*; essa è infatti un'apparenza percettiva solida, consistente, reale, e comunque più resistente delle chiacchere nozionistiche scolastiche, cfr. [2].

Anche qui ci troviamo di fronte ad un significativo ostacolo epistemologico; non può essere aggirato con il solito approccio astratto, definitorio, frettoloso; può essere risolto con un salto nella comprensione, se viene affrontato nel biennio (e non prima) mettendo in relazione le concezioni spontanee degli studenti con il contesto problematico che ha permesso il passaggio dalle concezioni prescientifiche a quelle attualmente accredidate. Vi è un anno, il 1772, che viene indicato come spartiacque tra la chimica prescientifica e quella scientifica: in quell'anno Lavoisier fece la scoperta rivoluzionaria che durante la combustione si ha la combinazione con l'aria:

> Sono circa otto giorni che ho scoperto che lo zolfo, bruciando, invece di perdere peso ne acquista al contrario (…) Questo aumento di peso deriva da una quantità prodigiosa di aria che si fissa durante la combustione (…) Questa scoperta m'ha fatto pensare che ciò che osservavo nella combustione dello zolfo e del fosforo avrebbe potuto aver luogo con tutte le sostanze che acquistano peso con la combustione e la calcinazione» [5, p. 103].

La rivoluzione chimica lavoisieriana costituiva una confutazione totale della teoria del flogisto, teoria che durante il Settecento era stata considerata una grande

teoria scientifica, capace di spiegare molti fenomeni chimici. Questa teoria aveva, per esempio, compreso che combustione e calcinazione dei metalli sono due fenomeni chimici simili nonostante la diversa apparenza fenomenica, ma era arrivata a questa importante conoscenza sulla base di una spiegazione sbagliata: la teoria del flogisto affermava, infatti, che in ambedue i fenomeni vi era, invece che combinazione con aria, emissione di flogisto. Furono necessari 20-30 anni per l'affermazione della teoria di Lavoisier. Molti chimici affermati non l'accettarono mai; è emblematico il caso del geniale chimico sperimentalista Priestley che fino alla morte considerò vera la teoria del flogisto, nonostante che fosse stato lui ad effettuare per primo molti esperimenti che vennero poi utilizzati da Lavoisier per confermare ed approfondire la sua teoria.

I chimici ormai affermati dovevano effettuare una specie di conversione: erano in gioco due visioni del mondo totalmente opposte. Sono rivelatrici di queste immani difficoltà epistemologiche e psicologiche le seguenti considerazioni che il grande chimico francese Macquer effettuò nella seconda edizione del suo *Dizionario di chimica* nel 1778:

> Se ciò fosse vero, verrebbe distrutta tutta la teoria del flogisto, cioè del fuoco combinato. A tal idea non ha però almeno finora acconsentito questo valente fisico (Lavoisier), che sopra un punto così delicato vuole ancora sospendere il suo giudizio. Questa cautela è certamente lodevole, essendo appunto quella che forma il carattere d'un vero chimico, di cui fregiati non sono que' fisici, i quali non conoscendo il pregio di questa bella scienza, si credono capaci di realmente rovesciarla, e colla scorta d'un sol fatto, che essi suppongono bastantemente comprovato, presumono di oscurare in un momento tutto lo splendore di una delle più grandi teorie, a cui siasi innalzato il genio della chimica: d'una teoria appoggiata ad un numero sorprendente di convincenti esperienze, alla forza delle quali non possono resistere neppure i talenti più illuminati [7, p. 132].

Nei quindici anni successivi al 1772, Lavoisier si dedicò ad un programma di ricerca finalizzato alla conferma ed all'approfondimento di queste ipotesi, avendo egli fin dall'inizio intuito la loro portata rivoluzionaria. Il chimico francese, reinterpretando completamente, alla luce della sua ipotesi, le scoperte sperimentali di molti altri chimici (quali Priestley), elaborò i principi basilari della scienza chimica.

Innanzitutto il *Principio di conservazione del peso.* Lavoisier aveva intuito che doveva operare in sistemi chimici chiusi, in recipienti ermeticamente chiusi, che impedissero il passaggio dell'aria. Operare in questo modo era completamente innaturale, anche per il rischio di esplosione nel riscaldamento ad alte temperature di recipienti di vetro chiusi. Vediamo le considerazioni di Lavoisier:

> Ecco il ragionamento che mi sono fatto a me stesso: se l'aumento di peso dei metalli calcinati nei recipienti chiusi, è dovuto, come pensava Boyle, all'addizione delle sostanze della fiamma e del fuoco che penetra attraverso il pori del vetro e che si combina con il metallo, ne consegue che; se dopo aver introdotto una quantità conosciuta di metallo in un recipiente di vetro, ed

> averlo chiuso ermeticamente, se ne determina esattamente il peso; se si procede poi alla calcinazione per mezzo fuoco dei carboni, come ha fatto Boyle; ed infine se si ripesa lo stesso recipiente dopo la calcinazione prima di aprirlo, il suo peso deve trovarsi aumentato di tutta la quantità della sostanza del fuoco che si è introdotta durante la calcinazione. Se, al contrario, mi sono detto ancora, l'aumento di peso della calce metallica non è dovuta alla sostanza del fuoco né di alcuna sostanza esterna, ma alla fissazione di una porzione di aria contenuta nel volume del recipiente, il recipiente non dovrà essere più pesante dopo la calcinazione di prima, dovrà solamente trovarsi in parte vuoto di aria, e non è che al momento in cui la porzione di aria mancante sarà entrata che l'aumento di peso del recipiente dovrà aver luogo [6, pp. 106-107].

È con esperimenti di questo tipo, condotti in recipienti chiusi, che Lavoisier fu in grado di iniziare a confermare due principi basilari della chimica:

1. il principio della conservazione del peso nelle trasformazioni chimiche;
2. la combustione e la calcinazione dei metalli sono due fenomeni che avvengono con combinazione con l'aria.

Dopo queste scoperte, il peso che fino ad allora era stato considerato una proprietà della materia di scarsa rilevanza teorica per la chimica, diventò la variabile più importante della *scienza chimica*, e la bilancia divenne lo strumento fondamentale.

Anche per la chimica, come già era avvenuto nel secolo precedente per la fisica, il superamento della fase prescientifica si realizzò con l'individuazione di concetti quantitativi, sulla base di un principio quantitativo, il principio di conservazione del peso. Anche per la chimica, la matematizzazione costituì il passaggio decisivo, ma costituì una matematizzazione deludente per chi era ormai abituato ai sublimi vertici matematici raggiunti dalla fisica con la meccanica razionale. Questa disciplina aveva, infatti, raggiunto una tale perfezione da essere considerata fino ad Enstein la vera descrizione del mondo. Aveva conseguentemente assunto il ruolo di modello della razionalità scientifica, rispetto al quale giudicare le altre scienze. Il riduzionismo imperante non ha permesso per molto tempo di cogliere la sublime semplicità del linguaggio matematico della *chimica classica*, che è costituito essenzialmente dalle quattro operazioni e dalle proporzioni, e che ha, a nostro parere, implicazioni pedagogiche di grande rilevanza.

La chimica, come è usualmente insegnata, è troppo complessa, in quanto presuppone delle solide basi di tipo fisico, ed indubbiamente, se il ruolo formativo della chimica coincidesse con le teorie chimiche del Novecento, nella disputa che dura da decenni tra chimici e fisici sullo spazio da attribuire all'una e all'altra nella scuola secondaria superiore, non ci potrebbero essere dubbi (a parte le richieste di tipo corporativo) nell'assegnare alla fisica una collocazione centrale, ed alla chimica un ruolo secondario negli anni terminali della scuola secondaria superiore.

Se invece la chimica viene concepita nel suo significato epistemologico e culturale, la situazione risulta radicalmente diversa, in quanto il formalismo e la matematizzazione della chimica classica sono di un livello più che elementare rispetto a quelli della fisica.

La matematizzazione delle leggi classiche della chimica è sostanzialmente riconducibile alle 4 operazioni ed alle proporzioni.

A parere di Lavoisier, la teoria più importante che era stata ereditata dai chimici delle generazioni precedenti era la gerarchia composizionale esistente tra sali, acidi e basi

SALI

ACIDI BASI

Conseguenza immediata della scoperta del 1772, che Lavoisier fu in grado di confermare negli anni successivi, fu il completamento di questo schema composizionale con l'aggiunta dei metalli e dei metalloidi:

SALI

ACIDI BASI

METALLOIDI METALLI

I metalli e sostanze, quali lo zolfo, il fosforo ed il carbonio risultarono più semplici degli acidi, delle basi e dei sali.

Anche l'elementarità dei metalli non è naturale, come non sono naturali la maggior parte dei metalli. Fin dall'antichità, essi hanno svolto un ruolo importante nella vita degli uomini, fin da quando fu inventata la tecnica che permetteva di ricavarli in fornaci potenti, a partire da minerali opportuni e carbone. I metalli erano il risultato della combinazione di determinati minerali e carbone; apparentemente risultavano meno semplici dei minerali da cui erano ricavati. Lavoisier fu in grado con la teoria dell'ossigeno di mostrare il contrario, che ad esempio, le calci metalliche erano dei composti di metallo ed ossigeno.

Trascorsero, tuttavia, circa altri dieci anni, prima che essi assurgessero al ruolo di elementi chimici. Lavoisier dovette, infatti, sia cercare di confermare il più possibile che essi non fossero ulteriormente decomponibili, che, come abbiamo già detto, fare i conti con la teoria dei quattro elementi. Soltanto nel 1787, formulò l'ipotesi moderna di elemento chimico, nei seguenti termini: «Se al contrario attribuiamo al nome di elementi o di principi delle sostanze l'idea del termine ultimo al quale arriva l'analisi, tutte le sostanze che non siamo stati capaci ancora di decomporre in alcun modo, sono per noi degli elementi» [4, p. XVII].

Il concetto di elemento chimico diventava da idea metafisica un concetto operativo: doveva essere considerato elemento ciò che resisteva all'analisi chimica, ed, in teoria non avrebbe potuto mai esserci la certezza che si fosse individuata la tecnica di analisi sufficiente. Lavoisier introdusse nella sua Tavola degli elementi chimici anche delle sostanze (delle calci metalliche), che sarebbero poi state decomposte successivamente, benché egli pensasse che non fossero elementi.

Il concetto di sostanza e di elemento non sono concetti autoevidenti, naturali, che

possano essere assunti nell'insegnamento come assiomi. Sono essi che vanno compresi a partire dalle conoscenze di senso comune degli studenti, connesse a fenomenologie chimiche elementari. È necessario un lungo percorso nella scuola di base e nel biennio, con un'impostazione prima di tipo fenomenologico-operativo, e poi di carattere problematico e contestuale. Nella scuola di base si può arrivare fino al concetto di sostanza, che va poi ulteriormente approfondito; la distinzione, invece, tra elemento e composto va costruita nel biennio, perché con questi concetti si realizza un salto di tipo epistemologico: sono, infatti, concetti non di tipo osservativo ma squisitamente teorico, la cui comprensione si ha né con esperimenti ingenui, né con definizioni.

I concetti di *elemento* e *composto* sono strettamente interrelati ad altri concetti chimici fondamentali, quali quelli di bagno pneumatico, gas, sistema chimico chiuso, principio di conservazione del peso, ruolo dell'ossigeno, e gerarchia composizionale del mondo inorganico. I concetti di elemento e composto possono essere compresi soltanto se si ricostruisce la rete delle relazioni che li connette a tutti questi altri concetti. Questi si incontrano prima o poi anche nell'insegnamento usuale della chimica, ma in modo atomistico e acontestuale. Invece la comprensione degli uni e degli altri è solidale, e risiede nelle relazioni che li connettono. Un concetto potrà poi avere per lo studente significato di carattere generale solo perché sarà stato messo in condizioni di ricavarlo da situazioni specifiche, caratterizzate da contesti specifici.

8. Il significato degli strumenti scientifici nell'apprendimento

Parlando della scienza moderna si sottolinea giustamente il ruolo fondamentale degli strumenti scientifici: essi hanno permesso infatti di osservare la natura in un modo molto più efficace, facendo vedere cose inimmaginabili alla percezione diretta. Gli esempi che vengono sempre fatti sono quelli del microscopio e del cannocchiale; tuttavia se si analizza lo sviluppo di una qualsiasi disciplina scientifica, ed in particolare della chimica e della fisica, si osserva costantemente uno sviluppo parallelo di nuovi concetti e di nuovi strumenti. Si può effettivamente comprendere, come afferma Geymonat, il nesso inscindibile di teoria e tecnica: cioè, da una parte, sono gli strumenti che permettono di conferire realtà alle più ingegnose congetture scientifiche, e dall'altra sono le teorie e le ipotesi che spesso guidano l'invenzione ed il perfezionamento degli strumenti.

Il laboratorio scientifico è raramente utilizzato, e quando è impiegato sistematicamente negli istituti tecnici e professionali, spesso lo è in modo cognitivamente poco significativo: si riduce essenzialemente all'addestramento a determinate tecniche di analisi.

Tra scienza e tecnica vi è, nel caso della chimica, un tale stretto rapporto che nell'insegnamento tradizionale il laboratorio chimico diventa addestramento a tecniche chimiche, all'utilizzo di specifici strumenti. Vi è, tuttavia, una totale separazione: da una parte, le conoscenze chimiche, la teoria, dall'altra, la pratica, la tecnica intesa come attività di routine, standardizzata.

In un insegnamento centrato sulla comprensione, teorie e concetti, tecniche e strumenti devono essere, invece, riaggregati, perché il significato si realizza circolarmente dagli uni agli altri. In questo modo anche nell'apprendimento, gli strumenti scientifici possono svolgere il ruolo cognitivo che loro compete, quello di strumenti indispensabili per la costruzione e comprensione di molti concetti scientifici.

Già Bacone aveva compreso la fondamentale importanza cognitiva degli strumenti: «Non la sola mano, o l'intelletto in sé possono sussistere; tutto si compie mediante gli strumenti e i mezzi ausiliari». Vygotskij e Bruner hanno ripreso tutto ciò nella prospettiva della loro psicologia culturale e sociale.

Bibliografia

[1] Barsantini L., Fiorentini C., *L'insegnamento delle scienze verso un curricolo verticale. Volume primo: i fenomeni chimico-fisici,* IRRSAE Abruzzo, L'Aquila 2001.

[2] Cavallini G., *La formazione dei concetti scientifici,* La Nuova Italia, Firenze 1995.

[3] Kuhn T., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche,* Einaudi, Torino 1969.

[4] Lavoisier A., *Traité élémentaire de Chimie, Tome Premier,* Imprimerie impériale, Parigi 1870.

[5] Lavoisier A., Dètails historiques sur la cause de l'augmentation de poids qu'acquièrent les substances mètalliques, lorqu'on les schauffe leur exposition à l'air, in *Oeuvres de Lavoisier*, tomo II, Impremerie impériale, Parigi 1862.

[6] Lavoisier A., *Mèmoire sur la calcination de l'étain dans les vaisseaux fermés,*in *Oeuvres de Lavoisier*, tomo II, Impremerie imperiale, Parigi 1862.

[7] Macquer P., *Dictionnaire de chimie,* Didot, Parigi 1778.

[8] Schwab J. J., Branwein P. F., *L'insegnamento della scienza,* Armando, Roma 1965.

[9] Thackray A., *Atomi e forze. Studio sulla teoria della materia in Newton,* Il Mulino, Bologna 1981.

[10] Tornatore L., *Educazione e indagine in Dewey,* in Vasoli C., Tornatore L., Maragliano R., Mosconi G., Lumbelli L., *Educazione alla ricerca e trasmissione del sapere,* Loescher, Torino 1981.

[11] Watkins J., *Contro la scienza normale,* in *Critica e crescita della conoscenza,* a cura di I. Lakatos e A. Musgrave A., Milano, Feltrinelli 1976.

L'insegnamento della Biologia

Brunella Danesi

Redazione di 'Naturalmente'

Indirizzare gli studenti alla consapevolezza che non esistono forze misteriose e imprevedibili, ma che tutto può essere oggetto di indagine e spiegato attraverso l'uso sistematico della ragione, è un'impresa difficile. I modelli scientifici che vengono proposti in classe entrano spesso in contrasto con le rappresentazioni immediate ed ingenue che gli adolescenti si sono costruiti; questo, d'altra parte, non deve destare stupore: il nostro cervello si è evoluto proprio per rispondere in modo immediato alle sollecitazioni ambientali e solo molto tardi l'uomo ha iniziato ad utilizzare quel potente mezzo di esplorazione che è l'esperimento controllato, base di tutte le scienze sperimentali.

Le spiegazioni scientifiche si appellano alla ragione, all'analisi accurata dei dati, alla loro rielaborazione critica. La scienza, inoltre, porta a interpretazioni che non sono mai definitive; qualsiasi scoperta è destinata ad essere superata e ad invecchiare, sostituita da altre più soddisfacenti, anche se è bene sottolineare che la sostituzione di teorie non ne inficia la validità temporanea e, comunque, molte di queste portano benissimo i loro anni!

Certamente l'indagine scientifica, qualunque sia l'ambito a cui si rivolge, non dice nulla sulla necessità o dignità dell'esistenza dell'oggetto di indagine; a differenza dell'arte o della poesia, non porta consolazione all'uomo, ma soltanto al «disincantamento del mondo» [1], all'abbandono di quel pensiero magico che aveva accompagnato la storia dell'umanità per millenni; la scienza moderna degli ultimi 400 anni è riuscita a costruire una crosta sottile di razionalità sotto la quale si agitano e premono ancora miti, spiriti benefici o malevoli, che riaffiorano continuamente con la loro forza consolatoria. Forse proprio per questo motivo la scienza è poco amata dagli adolescenti alla ricerca continua di spiegazioni ultime e definitive. Non si può inoltre trascurare il fatto che ormai da anni è in corso una serrata critica nei confronti della scienza e della tecnologia, a cui si attribuiscono tutti i mali dell'umanità; molti intellettuali di orientamento luddista, postmoderno o ecologista sono apertamente su posizioni antiscientifiche e c'è chi arriva a sostenere che in realtà non esiste differenza fra la scienza e la magia o l'alchimia. Pur non entrando nel merito della questione, sarebbe bene rilevare che – se non altro – la scienza è un processo democratico cui tutti quelli che vogliono hanno libero accesso.

Compito dell'insegnamento scientifico è proprio quello di dare un senso alla scienza che altrimenti verrà considerata solo un mezzo per ottenere determinati fini pratici, e non una produzione culturale nel senso più ampio del termine. L'avventura scientifica

non conduce alle Essenze, al Vero, alla Felicità ... ma vale ugualmente la pena di essere perseguita in quanto «quando l'acqua curva un bastone, la mia ragione lo raddrizza» (La Fontaine).

L'insegnamento scientifico è particolarmente importante perché, quando ha successo, offre ai suoi fruitori un potente strumento per pensare razionalmente, fa capire che nella ricerca esiste un solo fondamentale impegno, quello di aderire al postulato dell'oggettività della conoscenza; il dovere fondamentale dello scienziato nei riguardi dei colleghi e della società è quello di presentare sempre lo stato del sapere scientifico per come è, senza nascondere i problemi aperti o i rischi connessi con determinate scoperte; deve anche far capire come l'intento della ricerca è quello di migliorare le conoscenze, e quindi di ridurre incertezze e rischi legati a determinati problemi.

L'insegnamento scientifico, di per sé difficile per i motivi su esposti, si rivela particolarmente arduo nel caso dell'insegnamento della biologia per i motivi che in questa sede verranno brevemente esaminati.

1. Problemi nell'insegnamento della biologia

Nella scuola media tutte le scienze sperimentali sono abbinate alla matematica e, nell'ultimo tentativo di riforma, anche alle applicazioni tecniche; qui, nella stragrande maggioranza dei casi, il loro insegnamento è spesso tralasciato a favore della matematica o affidato esclusivamente alla lettura dei manuali adottati.

Nella scuola secondaria di secondo grado, l'insegnamento della biologia è svolto generalmente abbinato alle scienze naturali che per una consuetudine antica comprendono tutte le discipline affermatesi successivamente alla grande rivoluzione scientifica del Seicento, chimica, scienze della terra e appunto biologia. Nelle scuole tecniche e professionali, la biologia è svolta esclusivamente a livello di biennio; nei casi più fortunati, come in quegli istituti dotati di mini- o maxi-sperimentazioni, la biologia accompagna l'allievo per tutto il quinquennio, smistata nel modo più vario; anche in queste situazioni più fortunate, però, molto spesso troviamo tale insegnamento accorpato a quella materia fumosa e proteica che sono le Scienze Naturali.

Enrico Pappalettere, in un articolo apparso sulla rivista *Naturalmente* nel lontano 1989 affermava fra l'altro:

> in nessun insegnamento come in quello delle Scienze è richiesto di coprire una così vasta area di competenze disciplinari inesistenti a monte e direi inesigibili, visto che esse discenderebbero da una preparazione universitaria corrispondente ad altre due o tre lauree [...]
>
> l'insegnante di Scienze continua a sopportare […] gli oneri di una inattingibile competenza in numerosi e vasti territori disciplinari, diversi per contenuti, metodi e abilità richieste. [...] l'istinto di sopravvivenza e la necessità di adattarsi ai diversi e concreti contesti scolastici spingono il docente di Scienze a costruirsi nei fatti una identità più precisa attraverso strumenti empirici come i «tagli» del programma, il rallentamento del cammino e il «volare basso» nei campi del sapere meno familiari e amati [...]

> Tutto ciò appare normale e anche positivo, ma ha il difetto di essere il prodotto di uno stato di necessità, di essere casuale [...] quel che manca è la trasparenza di un disegno comune, di un progetto culturale minimo che fondi l'identità di base della formazione fornita da un qualsiasi insegnante di Scienze in Italia.[2]

Che cosa è successo da allora? Fondamentalmente molto poco. I programmi Brocca (1988-1994) avevano fatto sperare a un ripensamento generale dei «programmi» e quindi anche di quello di Scienze , ma tale riforma è – nel bene e nel male – abortita e, anche se le associazioni disciplinari degli insegnanti, l'IRRSAE e altre associazioni hanno proposto nuovi curricoli, questi non sono stati diffusi in modo adeguato, tanto che pochi ne sono a conoscenza; in compenso, la cattedra dell'A060, cioè quella che interessa l'insegnamento delle scienze nella scuola superiore, si è ulteriormente espansa ed attualmente parla di Scienze naturali, Chimica, Geografia, Microbiologia.

Sono state istituite le SSIS, ma certamente non è quella la sede in cui avviare un ripensamento dell'insegnamento delle Scienze Naturali, perché ciò spetterebbe a un disegno di Riforma finalmente coerente e che tenga conto degli studi portati avanti nel corso degli anni dalle associazioni disciplinari. Nell'ambito delle attività formative, il Ministero della Pubblica Istruzione ha proposto alle scuole e alle Direzioni Regionali, il piano ISS (Insegnare le Scienze Sperimentali), che si avvia a partire dall'anno scolastico 2006/2007 e prevede la formazione di un certo numero di docenti *tutor*, attraverso la messa a disposizione di una piattaforma INDIRE e la partecipazione a iniziative di formazione coordinate a livello nazionale e regionale; tutti si augurano che il progetto vada a buon fine, ma per il momento l'insegnamento scientifico sembra ancora abbandonato alla buona volontà dei singoli docenti.

Per il momento, le indagini condotte dall'OCSE-PISA circa la *scientific litteracy* dei nostri adolescenti danno risultati sconfortanti: l'Italia si attesta su posizioni al di sotto della media europea e il numero di laureati nelle facoltà scientifiche è poco più della metà della media OCSE. Quali i motivi di tale disfatta? Uno può anche essere stato quello di aver dato troppo spazio ai progetti d'Istituto che spesso sono andati a scapito della azione ordinaria. Per fronteggiare la situazione ci sarebbe bisogno di migliorare l'insegnamento quotidiano e diminuire gli interventi episodici; puntare, poi, soprattutto nelle prime classi della scuola superiore, sugli aspetti ludici dello studio, ha fatto dimenticare che un solido apprendimento non può avvenire senza «sudore».

Il disinteresse politico, ormai atavico, per le dimensioni culturali ed economiche della scienza che accompagna la storia italiana è probabilmente dovuto anche a un sistema di potere politico-accademico che ha spesso annullato ogni selezione basata sul merito, sacrificando e mortificando gli scienziati intellettualmente più motivati.

È però del tutto inutile protestare e pensare a una scuola ideale che non c'è; anche se una seria formazione scientifica sembra non interessare nessuno nella nostra società e certamente non ha interessato i governi che si sono succeduti negli anni, è importante non piangersi addosso, anche perché è faticoso trascorrere il tempo a scuola pensando solo alla liberazione del pomeriggio.

La biologia è una disciplina multiforme, che presenta una grande quantità di specializzazioni che, in ordine alfabetico, vanno da aerobiologia a zoologia, passando per citologia, cladistica, ecologia, neuroscienze e via discorrendo – tutte discipline che hanno metodi di indagine loro propri ed esaminano diversi livelli di complessità del vivente, dalle molecole, alla cellula, alle popolazioni, all'intera biosfera. Altre discipline, inoltre, derivano o afferiscono alla biologia, come la bioetica, le biotecnologie, la biofisica, la paleontologia.

In biologia esistono argomenti squisitamente trasversali, come i modelli evolutivi e la biologia teoretica. Si tratta dunque di una disciplina in grande espansione, le cui scoperte stanno modificando e modificheranno il nostro mondo nei prossimi anni, ma in cui stenta a farsi strada una teoria unificante, un modello esplicativo comune, che invece è presente nelle scienze dure come la fisica o la chimica. La biologia, inoltre, è una scienza «di moda»; gli studenti sono continuamente bombardati da notizie sensazionali che riguardano scoperte di geni che controllerebbero il comportamento individuale, polemiche legate all'uso dell'ingegneria genetica nei prodotti alimentari, discussioni sulle neuroscienze, sulla clonazione, sui metodi di fecondazione assistita, sui disastri ambientali, e così via.

È chiaro che gli studenti dovrebbero uscire dalla scuola superiore in grado di poter leggere un articolo scientifico senza confondere, ad esempio, fecondazione assistita con clonazione o digestione con assorbimento, trachea con esofago, senza pensare che i lombrichi hanno un piano di organizzazione simile a quello dei serpenti e via dicendo, ma l'insegnante non può limitarsi a fornire e pretendere informazioni; anche se queste sono importanti, devono essere ancorate a strutture concettuali che organizzino i contenuti disciplinari. L'insegnamento non può quindi ridursi a una vaga affabulazione sugli argomenti più disparati.

Se si desidera che la biologia abbia valore formativo, è necessario:

- tener conto delle 'cosmologie' pregresse degli allievi, per scalzarle e sostituirle gradualmente con conoscenze scientifiche fondate;
- organizzare i contenuti nei concetti portanti della disciplina.

Relativamente al primo punto, è molto utile sottoporre i nostri quindicenni a questionari aperti in cui essi possano esporre liberamente le loro idee sull'argomento che dovranno affrontare. Gli studenti mostrano convinzioni profondamente radicate; le «misconoscenze» più diffuse – di cui si deve tener conto – derivano principalmente da un ostinato antropocentrismo, che, per riprendere una bella espressione di Gould, definirei «arroganza cosmica», per cui l'uomo è il signore indiscusso del pianeta e certamente riuscirà a superare qualunque problema. Manca totalmente, in loro, la consapevolezza del tempo profondo e, dato che esiste l'uomo e il resto del pianeta, c'è la forte convinzione che la biologia abbia esclusivamente finalità applicative (s'ignora dunque la distinzione fra scienza e tecnica). Il compito della biologia è per i nostri adolescenti fondamentalmente di ordine pratico: salvare l'umanità e l'intero pianeta;

e certamente questo sforzo avrà successo, perché *l'uomo è il più evoluto di tutti gli animali e non può essere paragonato agli altri, [...] troppe sono le differenze* (Marco, 3ª liceo scientifico, 1998).

All'interno di queste convinzioni si legge anche un altro aspetto del problema, cioè, quello di aver introiettato nette dicotomie: uomo-animali, uomo-ambiente, interno-esterno. È quindi impresa ardua parlare di organismi come di sistemi fra loro strettamente interconnessi che si influenzano reciprocamente e reciprocamente si modificano. Tutti, alle soglie della scuola superiore, hanno sentito parlare di evoluzione, ma inconsapevolmente la maggior parte abbraccia la tesi lamarckiana, per cui, ad esempio, i neri sono diventati tali perché, essendo esposti al sole si sono progressivamente scuriti; esistono gli individui, un ambiente che cambia e i singoli che si adattano, mentre in realtà il singolo individuo non evolve, sono le caratteristiche medie di popolazioni interfeconde che, interagendo con l'ambiente, cambiano, senza però che vi sia un migliore o peggiore in assoluto (questo dipende dal contesto).

Per quanto riguarda il secondo punto, ritengo che siano largamente utilizzabili le riflessioni fatte dal grande maestro Ernst Mayr[3] a proposito della specificità della biologia, come scienza atipica rispetto alle altre scienze sperimentali. Mayr ha sottolineato come non sia affatto vero che tutte le scienze sperimentali abbiano lo stesso schema concettuale; certamente, tutti i viventi – al pari della materia inanimata – ubbidiscono alle stesse leggi fisico-chimiche e non esiste alcuna «forza vitale», ma i viventi non possono essere studiati, come voleva Cartesio, alla stregua di semplici macchine.

> Si è cercato di fornire un'unica classificazione razionale delle discipline della vita che abbracciassero l'ampio spettro dei fenomeni ricondotti comunemente alla biologia. Fra tutte le classificazioni finora proposte, la più fuorviante si è rivelata quella che suddivide la biologia nelle tre branche: descrittiva, funzionale e sperimentale. Tale classificazione non soltanto esclude interi ambiti della biologia (come, per esempio, la biologia evolutiva) ma ignora anche che la descrizione è una necessità per tutta la biologia e che l'esperimento è lo strumento principale di analisi quasi esclusivamente nella biologia funzionale.[4]

Le diverse biologie rispondono a diverse domande che possono essere poste a proposito dei viventi: *come, perché, che cosa*[5].

2. La biologia del *come*

La ricerca del *come* riguarda argomenti di biologia funzionale o argomenti connessi ai livelli di organizzazione cellulare e sub-cellulare; in questo caso è necessario render chiaro che ci stiamo muovendo adottando le stesse tecniche di indagine proprie della fisica e della chimica, per cui si deve fare appello alle conoscenze pregresse degli studenti in tali discipline e ricorrere a esperimenti di laboratorio più o meno sofisticati, anche se va chiarito che gli esperimenti vengono compiuti per verificare determinate ipotesi e non devono portare ad un induttivismo ingenuo. Le tappe della ricerca scientifica individuate da Claude Bernard[6] – cioè, O-osservazione, H-ipotesi, E-esperimento,

R-risultato, I-interpretazione, C-conclusione – sono puri artifici e un esperimento così condotto può soltanto illustrare un determinato argomento, mentre il percorso sperimentale dovrebbe risultare più aperto, meno indirizzato verso l'esperienza 'giusta' in modo da sollecitare la libera iniziativa degli studenti; l'armamentario sperimentale non dovrebbe essere sistemato in funzione di ciò che il docente vuole dimostrare e dei risultati che vuole ottenere. È invece necessario approntare una situazione sperimentale realmente aperta.

Un altro punto deve essere tenuto presente quando si studiano i *come*: quando ci si muove da un piano all'altro (dalle molecole agli organuli, alle cellule e così via), i livelli di organizzazione acquisiscono caratteri loro propri, non precisamente prevedibili soffermandosi solo ai livelli sottostanti. Studiando una serie di reazioni metaboliche, siamo di fronte a una rete di reazioni fra loro strettamente interconnesse, per cui la modifica anche di una sola di queste comporta una serie di cambiamenti complessivi del sistema non strettamente prevedibili – tema più volte affrontato, anche in saggi divulgativi, da Buiatti[7]. È questo un problema che deve essere messo in luce insistentemente con gli studenti, perché può far capire, ad esempio, le difficoltà incontrate dai biotecnologi quando introducono in una specie un gene proveniente da altri organismi, e rende anche ragione del fatto che non esiste il gene dell'intelligenza matematica o il neurone, stimolato il quale, si può richiamare alla memoria la figura della nonna.

Mayr, inoltre, mette in luce che la descrizione dei fenomeni, intesa come registrazione accurata dei fatti, è fondamentale in biologia, come del resto nelle altre scienze sperimentali, perché si tratta del primo passo indispensabile per procedere all'interpretazione dei fenomeni stessi. Il metodo riduzionista è un mezzo di indagine potente, un mezzo che gli studenti dovrebbero poter utilizzare nei laboratori; da solo, però, non basta per dar conto delle Scienze della Vita (coniugate al plurale). Nei manuali scolastici comunemente utilizzati nel triennio, la biologia del *come* è generalmente trattata per prima e, tutto sommato, è quella che viene svolta in modo più esaustivo dai docenti, che però non dovrebbero limitarsi a questa, perché, ribadendo una classica affermazione di Dobzansky, «niente ha senso in biologia se non alla luce della teoria dell'evoluzione».

3. La biologia del *perché*

Non ci si può pertanto limitare al *come* – vale a dire, a *come* funziona un dato organo, a *come* avviene una certa reazione metabolica e così via – ma è lecito indagare anche il *perché* [8]: cui si può rispondere solo con metodi di indagine completamente diversi da quelli adottati dalla fisica (o per lo meno da quella che si insegna a scuola). Quando si indagano le cause remote che hanno determinato le caratteristiche dei viventi presenti attualmente sul pianeta o il loro comportamento, i metodi tradizionali delle scienze fisiche non sono sufficienti, anzi sono fuorvianti. Il processo evolutivo, infatti, non è verificabile in laboratorio tranne che in casi eccezionali e le indagine dell'evoluzionista

sono molto più simili a quelle dello storico: egli cerca pazientemente documenti del passato, per ricostruire il cespuglio dell'evoluzione o comprendere in quale modo quella determinata struttura si è affermata nel tempo. È lecito, afferma ancora Mayr[9], chiedersi *perché* alcuni uccelli migrano in autunno: vi sono cause prossime, di tipo fisiologico, ma anche cause remote, cause evolutive, le uniche in grado di spiegare perché alcuni migrano ed altri non lo fanno.

I modelli evolutivi andrebbero affrontati facendo notare, attraverso un loro inquadramento storico, che hanno risposto a precisi problemi teorici –a problemi che erano già nell'aria da tempo nel periodo in cui fu scritta *L'origine delle specie*. Concetti come *adattamento* e *lotta per l'esistenza* vanno indagati in modo approfondito perché non siano oggetto di gravi fraintendimenti e soprattutto va fatto notare che, se la teoria ha preso le mosse dal lavoro di Darwin, molto è stato fatto da allora e attualmente essa rappresenta una potente chiave di interpretazione non solo in tutte le più varie branche della biologia, ma anche nello studio della patologia vegetale, animale ed umana. Il concetto darwiniano di adattamento è stato oggetto di numerosi studi che tendono ad evidenziare piuttosto le imperfezioni adattative, il concetto di preadattamento, l'inutilità di domande del tipo: qual è il valore adattativo della scomparsa dei peli? qual è il valore adattativo della comparsa del mento?

A questo scopo sarebbe molto utile rileggere alcuni passi del classico saggio di Gould e Lewontin[10], in cui gli autori mettono in evidenza come i pennacchi presenti nella cupola di San Marco, gli spazi a forma di triangolo allungato formati dall'intersezione di due archi posti ad angolo retto, sono sottoprodotti architettonici indispensabili quando una cupola è inserita su archi tondi e gli affreschi che contengono non sono la causa di tale architettura, ma una conseguenza, malgrado il profano possa avere l'impressione che siano stati costruiti ad hoc. Il naso, quindi, così come un'alta fronte e, tutto sommato, un grande cervello *non necessariamente* hanno avuto un valore adattativo.

Le cause prossime e quelle remote, d'altra parte, non possono costituire oggetti di studio separati ma sono fra loro profondamente interconnesse, come hanno dimostrato le scoperte sempre più numerose, sulla biologia delle sviluppo. Lo studio dello sviluppo embrionale e il sequenziamento del DNA sono campi di ricerca destinati a interagire sempre più strettamente e a far luce sulla storia della vita sulla terra. Lo studio su come agiscono i geni responsabili del differenziamento delle varie parti del corpo di un animale ha mostrato che essi hanno conservato gran parte delle sequenze nucleotidiche in specie filogeneticamente assai distanti. Questi stessi geni hanno mantenuto anche l'ordine di allineamento lungo i cromosomi, che riflette l'ordine con il quale essi entrano in azione nell'embrione.

Tali scoperte, per essere pienamente interpretate, hanno bisogno anche di rispondere all'altra domanda: *perché*? Il biologo Carroll, in un suo recente saggio [11], illustra i principi su cui si basa EVO-DEVO, sigla che significa *EVOlutionary DEVelOpmental biology*. Questa disciplina, relativamente recente, cerca di comprendere come sia possibile la nascita, come affermò Darwin, di infinite forme bellissime dalla semplice unione di due

gameti. Carroll mette in luce come l'approccio agli studi embriologici sia profondamente cambiato negli ultimi trenta anni: attualmente si sa che le differenze fra i viventi non sono costituite tanto dalla presenza di geni fra loro diversi, quanto dall'attivazione o inibizione di determinati geni in diversi momenti e in diverse zone dell'embrione. I viventi hanno infatti una struttura modulare ed esistono poche «scatole di montaggio» genetiche, i cui pezzi possono essere combinati in modo diverso per ottenere risultati differenti, proprio come succede nel gioco del meccano; è questo il motivo per cui animali molto diversi fra loro, come il moscerino della frutta, il riccio di mare e l'uomo hanno un patrimonio ereditario molto simile: ciò che determina le profonde differenze esistenti fra loro sono i tempi e i modi di montaggio. I numerosi geni omologhi, cioè condivisi tra specie diverse, dimostrano proprio questo. Gli *homeobox* sono in grado di accendere o spengere le scatole di montaggio e determinare così le caratteristiche del nuovo essere.

Le biologie, quindi, acquistano un senso solo se si confrontano continuamente l'una con l'altra e inoltre, citando ancora Mayr,

> Mentre la biologia funzionale ha numerose somiglianze con le scienze fisiche, la biologia evolutiva crea un ponte verso le scienze sociali e le scienze umane perché spesso si interessa dei medesimi problemi. In particolare, nello studio dell'uomo, si può constatare che le scienze dell'evoluzione e le scienze sociali per un ampio spazio si sovrappongono.[12]

Allora, come nel caso dello studio della storia umana, la predittività delle scienze fisiche viene meno in biologia; malgrado vi siano stati diversi tentativi volti a mostrare che il processo evolutivo è stato un dispiegarsi di eventi largamente prevedibili -si pensi ai lavori recenti di de Duve[13] o a quelli ormai classici di Pierre Teilhard de Chardin[14]- non esistono dati condivisi in tal senso e d'altra parte non esiste alcuna macchina del tempo che potrebbe riavvolgere a ritroso la storia della vita sulla terra per poi farla ripartire nuovamente.

L'evoluzione viene affrontata poco e male. Spesso non viene proprio trattata oppure è relegata a una scarno capitolo in cui tradizionalmente si parla di giraffe e di come Darwin andasse male a scuola; anche nel caso in cui sia svolta in modo approfondito, rimane spesso un capitolo o una serie di capitoli che raramente vanno a costituire una vera e propria cornice di tutti i fenomeni viventi.

4. La biologia del *che cosa*

La biologia del *che cosa* riguarda lo studio della biodiversità e non può fare a meno di quella parte della biologia che prende il nome di «classificazione del vivente», che nelle scuole italiane è di norma sorvolata.

La classificazione del vivente dovrebbe essere affrontata a partire dalle elementari, perché dar nome alle cose, far riferimento a un animale o a una pianta riconoscendone i caratteri distintivi, è una caratteristica tutta umana, tanto che nella Bibbia appare come una facoltà donata da Dio agli uomini. Nella scuola primaria la classificazione

del vivente è molto trascurata; a differenza dei bambini di molti altri stati europei, i nostri conoscono pochi nomi di piante ed animali mentre, proprio in quella fase in cui la memoria è così agile, sarebbe assai facile far loro riconoscere le differenze fra un abete e un pino, fra una cavalletta e una mantide; in questo periodo, naturalmente, dovrebbe prevalere l'aspetto descrittivo, associato a un sistema di ordinamento che fa appello a somiglianze morfologiche (raggruppiamo tutti gli animali con sei zampe, tutte le piante con fiori ...), senza trascurare visite nei numerosi musei sparsi nel territorio nazionale, dove sono presenti animali e piante attualmente scomparse.

I bambini dovrebbero essere guidati a «raccogliere i fatti», dovrebbero imparare a osservare l'ambiente che li circonda, a cominciare dal campo abbandonato vicino alla scuola, a notare i caratteri che distinguono i viventi dalla materia inanimata, magari confrontando una conchiglia o un fossile con una pietra, per iniziare a comprendere la fondamentale differenza fra i viventi e la materia inanimata. Inizialmente gli studenti avranno un approccio quasi esclusivamente statico ed essenzialista al problema – quello di definire ciò che distingue il gatto dal topo e dal canarino. Solo quando sarà ben chiaro il concetto di specie, si potrà far notar loro che all'interno delle popolazioni interfeconde esiste un'estrema variabilità su cui può agire nel tempo il cambiamento. Il tempo, che porta a lente, impercettibili variazioni, non fa ancora parte dell'esperienza dei bambini; per loro è già difficile comprendere che anche i nonni sono stati bambini.

Una base di sistematica, affrontata esaminando piante, animali, funghi sul campo, osservando al microscopio o attraverso foto il mondo microscopico, è indispensabile; senza i rudimenti della classificazione, non si può poi affrontare alle superiori temi importanti come quelli della convergenza evolutiva, della differenza fra micro e macroevoluzione o parlare seriamente di ecologia, biogeografia, genetica di popolazione: argomenti fondamentali per capire in modo serio quali sono i problemi ambientali che affliggono il nostro pianeta. Troppo spesso, le biologie del *perché* e del *che cosa* vengono relegate ai primi anni di studio e mai riprese, in quanto si ritiene che tali argomenti siano molto più semplici di quelli della biologia del *come*. In questo modo si perdono di vista i nuclei fondanti della disciplina.

NOTE

[1] Il tema di come il processo di razionalizzazione porti al «disincantamento del mondo» è affrontato in modo convincente da Weber, vedi [10] pp. 20-21.

[2] Vedi [9] pp. 3-4.

[3] Vedi [7] e [8].

[4] Vedi [7] p. 34.

[5] Mayr chiarisce la differenza fra le tre biologie in [8].

[6] Vedi [1].

[7] Vedi [2].

[8] Per una discussione sugli argomenti che sono oggetto di studio della biologia, vedi [7] pp. 31-32.

[9] Vedi [7] pg. 31-32.

[10] Vedi [6].

[11] Vedi [3].

[12] Vedi [7] p. 35.

[13] Vedi [5].

[14] Vedi [3].

BIBLIOGRAFIA

[1] Bernard C., *Introduzione allo studio della medicina sperimentale*, Piccin, Padova 1994.

[2] Buiatti M. , *Il benevolo disordine della vita* UTET, Torino 2004.

[3] Carroll S., *Infinite forme bellissime*, Codice, Torino 2006.

[4] De Duve C., *Come evolve la vita. Dalle molecole alla mente simbolica*, Raffaello Cortina, Milano 2003.

[5] Gould, S. J., Lewontin, R., *I pennacchi di San Marco e il paradigma di Panglosso*, Einaudi, Torino 2001 (ed. orig., in inglese, 1979). Scaricabile gratuitamente da: http://www.einaudi.it/einaudi/ita/pdf/gould-lewontin.pdf

[6] Mayr E., *Biologia ed evoluzione*, Boringhieri, Torino 1981.

[7] Mayr E., *Il modello biologico*, McGraw-Hill Italia, Milano 1998.

[8] Pappalettere E., Le scienze nella scuola secondaria superiore e il loro insegnamento: un nodo da sciogliere, *Naturalmente*, 2, n. 3 (1989) pp. 3-6.

[9] Teilhard de Chardin P., *Il fenomeno umano*, Queriniana, Brescia 2006

[10] Weber M., La scienza come professione, in Id., *Il lavoro intellettuale come professione* Einaudi, Torino 1948 / Mondadori, Milano 2006 (la conferenza fu tenuta da Weber nel 1917).

E-LAB: NUOVI STRUMENTI INFORMATICI PER L'INSEGNAMENTO DELLE SCIENZE BIOLOGICHE

Neri Niccolai

Università di Siena

Andrea Bernini

Università di Siena

Stefano Chiellini

SienaBiografix Srl, Siena

La Regione Toscana sta impegnando risorse cospicue per incentivare la ricerca nei settori delle biotecnologie e delle tecnologie dell'informazione e comunicazione, contando su una rete di eccellenti centri di ricerca pubblici e privati. È proprio in questa prospettiva che un ulteriore impegno è stato rivolto per il collegamento tra ricerca pubblica e privata con la costituzione del Parco Scientifico Toscana Life Sciences (TLS), in cui nuove imprese biotecnologiche potranno svilupparsi in un ambiente in cui le difficoltà di trasferimento dell'innovazione in prodotti da immettere nel mercato sono considerate in modo prioritario.

Non sorprende, quindi, che le Università di Firenze, Pisa e Siena offrano tutte Corsi di Laurea triennali e specialistici in Biotecnologie, ciascuno con specificità derivanti dalla sede proponente. Questo forte impegno formativo delle Università toscane, poco si armonizza con il basso livello della cultura scientifica presente nel territorio. Negli ultimi anni la Regione Toscana ha mostrato, a questo riguardo, una grande sensibilità sostenendo molte iniziative per la diffusione della cultura scientifica, quali Pianeta Galileo, Settimane della Cultura scientifica, Musei e Mostre sui temi della ricerca.

Non sorprende, quindi, che proprio dalla Toscana parta la proposta ***e*-lab***, per la progettazione ed allestimento di un laboratorio virtuale***.** Il progetto intende avvalersi delle forti potenzialità della realtà virtuale per replicare un laboratorio su una piattaforma *di e-learning*, da utilizzare per orientamento, formazione ed aggiornamento di un'ampia varietà di soggetti: dagli studenti delle scuole medie e superiori,[1] al personale dei centri di ricerca e produzione, al cittadino desideroso di accrescere i propri livelli di cultura su tematiche che sempre più spesso si incontrano nei mezzi d'informazione.

L'idea del laboratorio virtuale proposto prevede un insieme integrato di ambienti, apparecchiature scientifiche e dotazioni presenti nei laboratori universitari ed industriali

più attrezzati, riprodotte virtualmente in grafica computerizzata, interattive e fedeli alla realtà in ogni aspetto estetico ed operativo. I livelli di interattività che ciascuna apparecchiatura offrirà descriveranno efficacemente le potenzialità della procedura scientifica virtualizzata, ponendo l'operatore di fronte alle principali operazioni associate a ciascuna tecnica usata attraverso interfacce grafiche diverse a seconda del tipo di utenza prevista.



Figura 1.

Il progetto ***e*-lab** prevede la realizzazione di un'innovativa piattaforma multivalente per la formazione scientifica, e non una collezione di singoli oggetti informatici. Il progetto sarà quindi improntato ad una vera ricerca scientifica, anche di base, per la costruzione di un *framework* di lavoro, che mira a diventare un punto di riferimento, espandibile in futuro anche da altri soggetti grazie all'introduzione di nuovi standard dedicati agli ambienti virtuali di laboratorio.

I punti fondamentali dello sviluppo saranno i seguenti.

- Modularità: ovvero la possibilità di aggiungere o modificare indipendentemente le esperienze formative.
- Accessibilità: ovvero l'abilità di accedere a contenuti didattici da remoto.
- Interoperabilità: ovvero la possibilità di utilizzare gli stessi contenuti didattici su piattaforme hardware e software differenti.
- Persistenza: ovvero l'abilità di «resistere» ai cambiamenti tecnologici senza richiedere riprogettazione o riconfigurabilità del sistema.
- Riusabilità: ovvero la flessibilità di poter incorporare uno stesso componente

didattico in più contesti.

- Tracciabilità: ovvero le azioni intraprese ed i risultati dell'utente possono essere registrati per seguire e sviluppare il suo percorso formativo.

La realizzazione di ***e*-Biolab** è rilevante da molteplici punti di vista, ma gli obiettivi che con questo si vogliono raggiungere sono da un lato favorire la riqualificazione del capitale umano nel settore delle biotecnologie e, dall'altro, sviluppare uno strumento didattico innovativo per formazione ed orientamento scientifico.

I prodotti ed i metodi delle biotecnologie possono suscitare dibattiti in cui le posizioni espresse sono in larga misura influenzate da fattori etici, religiosi e politici. Perciò è importante diffondere/divulgare le basi scientifiche delle biotecnologie, allo scopo anche di ampliare la base oggettiva del dibattito. Il fatto che le biotecnologie associno alle loro immense potenzialità una pubblica percezione in larga misura negativa è stato considerato come un grave problema anche dall'Unione Europea.

Per questo, nei precedenti Programmi Quadro della ricerca comunitaria, sono state messe a punto strategie per operare una inversione di questa tendenza. In Toscana, ove le Biotecnologie rappresentano una importante quota delle attività produttive, il miglioramento della pubblica percezione del settore riassume, quindi, una particolare rilevanza. In questa prospettiva ***e*-Biolab,** permettendo di visualizzare tecniche e prodotti *biotech* con un'informazione accurata e di immediato impatto, può migliorare la pubblica percezione della scienza e delle biotecnologie in particolare.

Un laboratorio virtuale, utilizzabile in un'aula informatizzata, permette l'istruzione di studenti su metodologie scientifiche complesse, senza i problemi d'accesso che hanno i laboratori reali, soprattutto nei confronti di portatori di handicap, a causa dalla delicatezza delle apparecchiature in essi contenuti. Le modalità d'impiego degli ambienti virtuali per l'insegnamento delle scienze sono già state oggetto di studi, anche in pubblicazioni internazionali [1], nei quali sono state individuate le caratteristiche essenziali che questi ambienti devono possedere per poter avere un impatto psicologico altamente positivo nel far muovere, in un ambiente virtuale, gli utenti senza alcuna paura di danneggiare o fare del male e nell'offrire la possibilità di fare esperienze nella massima libertà. Negli stessi studi vengono sottolineati i pregi di questi progetti a supporto della didattica tradizionale.

I punti fondamentali di questo progetto possono essere raccolti in cinque parole chiave, ovvero:

- «imparare facendo», affiancando così ai metodi tradizionali di insegnamento, la possibilità di fare esperienza diretta virtuale e quindi sicura;
- «interattività», essenziale sia per riprodurre la realtà del laboratorio, sia per essere accattivante e far scaturire la curiosità, e quindi per accrescere la conoscenza;
- «flessibilità», importante per muoversi liberamente in un ambiente didattico

virtuale nel quale l'esperienza diventa importante anche quando fosse erronea nella sua metodologia;

- «tutor virtuali», i quali assumono una grande importanza ai fini didattici, per correggere eventuali procedure non corrette, e per far capire l'importanza dell'errore stesso.

Nel laboratorio virtuale, realizzate con una grafica adeguata per le simulazioni delle procedure oggetto dell'istruzione, saranno presenti riproduzioni funzionanti di apparecchiature sofisticate e costose quali quelle necessarie per la sintesi, purificazione e caratterizzazione di materiali biopolimerici, oltre alle piccole dotazioni quali pHmetri, centrifughe e vetreria.

Un tratto fondamentale di questo progetto è anche il reinserimento nella ricerca scientifica di portatori di handicap. Le persone diversamente abili sono escluse dall'accesso ai laboratori scientifici per la pericolosità degli ambienti stessi: qui si trovano infatti apparecchiature complesse e delicate, contenitori in cui sono tenuti reattivi chimici infiammabili, tossici e corrosivi al tatto ed all'inalazione – oggetti e sostanze pericolose per colui che effettua direttamente l'esperimento e per coloro che lo circondano. Sarà invece possibile avere, con ***e*-lab**, un accesso alle apparecchiature scientifiche ed al reagentario chimico necessario per condurre esperimenti mediante un'interfaccia grafica, a controllo eventualmente anche solo vocale. Questo progetto virtuale tende quindi a conseguire un ulteriore abbattimento delle barriere architettoniche, dando la possibilità a chiunque di interfacciarsi con tale realtà scientifica e dando ai portatori di handicap la pari opportunità all'istruzione scientifica.



Figura 2.

La realizzazione di ***e*-lab** ha molteplici valenze positive nel campo della crescita della cultura scientifica, specificamente nel settore in cui strutture pubbliche e private di ricerca sono particolarmente attive in Toscana, ovvero le biotecnologie. *Imparare facendo*, se pure in modo virtuale, può portare larghi strati di popolazione, studentesca e non, a contatto con gli strumenti ed i prodotti dell'innovazione scientifica.

***e*-lab** è una piattaforma per la formazione scientifica anche a distanza in cui le opportunità sono offerte in ugual misura a uomini e donne. Le piattaforme informatiche sono uno strumento che, anche attraverso procedure standard di *e-learning*, possono espandere percorsi formativi precedentemente riservati a studenti a tempo pieno; per questo motivo ***e*-lab** diventa un valido sostegno all'apprendimento scientifico per tutte quelle persone che, a causa di impedimenti vari, si trovano ad avere la maggior parte della propria giornata coinvolta in impegni, disponendo di poco tempo libero, e semmai in fasce orarie, quali quelle serali. Questo, ad esempio, è il caso più frequentemente incontrato tra le donne, le quali hanno i maggiori oneri nella gestione dei figli e quindi possono trarre vantaggio da ***e*-lab** per il proprio accrescimento culturale in campo scientifico, riequilibrando la loro possibilità di conoscenza.

Questo progetto, oltre che un potente strumento per l'istruzione, formazione ed orientamento in campo scientifico, si configura anche come un supporto espandibile ed aggiornabile per la società della conoscenza da inserirsi in percorsi di formazione continua.

***e*-lab**, avendo come obiettivo la formazione/informazione su processi biotecnologici che sono sviluppati nel territorio regionale, si avvale della collaborazione di *partner* industriali di grande rilevanza, quali Novartis Vaccines, e micro-imprese che operano, o stanno iniziando a farlo, nel Parco scientifico Toscana Life Sciences. ***e*-Biolab** si pone, dunque, come strumento per l'alta formazione collegato ai temi strategici dell'innovazione e del trasferimento tecnologico per indurre la diffusione della ricerca e dell'innovazione verso le imprese ed il territorio. Il coinvolgimento di *spin-off* universitarie, quali SienaBioGrafix, conferisce al progetto un notevole valore aggiunto.

La valorizzazione del capitale umano lungo tutto l'arco della vita (*life-long learning*) è considerata di importanza strategica per la comunità. In tal senso ***e*-lab** si configura come uno strumento rilevante per l'accrescimento/aggiornamento delle conoscenze in qualsiasi momento dell'attività del cittadino, sia come singolo, sia come appartenente ad un gruppo omogeneo di operatori da riqualificare.

La caduta dei costi necessari per l'acquisizione di elaboratori elettronici con buone prestazioni e gli incentivi che sono stati offerti a tutte le scuole di ogni ordine e grado, hanno favorito una capillare diffusione delle cosidette aule informatizzate. ***e*-lab** le trasforma in laboratori scientifici con le seguenti caratteristiche:

1. annullamento dei problemi di sicurezza connessi all'uso di laboratori convenzionali;

2. presenza integrata, nell'ambiente virtualmente ricostruito, di apparecchiature sofisticate e costose, ciascuna aggiornabile allo stato dell'arte delle varie metodologie;
3. bassi costi di manutenzione per il funzionamento della piattaforma informatica;
4. nessuna necessità di personale tecnico a sostegno delle operazioni effettuate;

Molecolando

In questa breve discussione vorremmo dare risposta ad una semplice domanda: possiamo vedere le molecole?

Ogni giorno siamo abituati a confrontarci con oggetti di varia grandezza, ma solitamente dell'ordine dei metri o centimetri, anche perché i manufatti dell'uomo tendono ad essere dimensionati per essere alla nostra portata, per ovvi motivi. La natura ha invece dimensionato gli oggetti su un scala molto più ampia, dalle migliaia di chilometri delle stelle ai milionesimi di millimetro degli atomi.

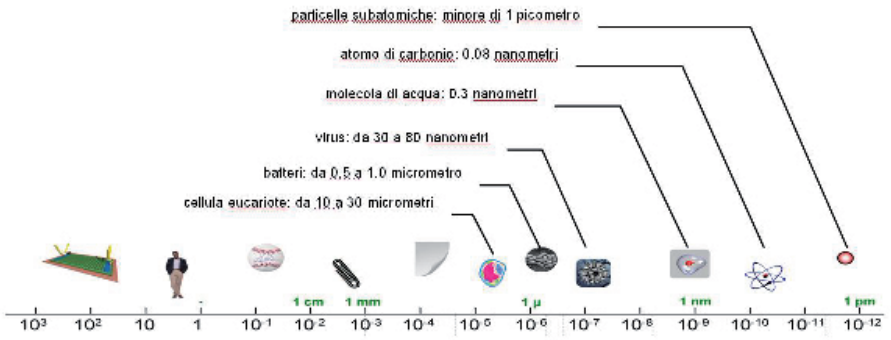

particella subatomiche: minore di 1 picometro
atomo di carbonio: 0.08 nanometri
molecola di acqua: 0.3 nanometri
virus: da 30 a 80 nanometri
batteri: da 0,5 a 1.0 micrometro
cellula eucariote: da 10 a 30 micrometri
1 cm
1 mm
1 µ
1 nm
1 pm
10³ 10² 10 1 10⁻¹ 10⁻² 10⁻³ 10⁻⁴ 10⁻⁵ 10⁻⁶ 10⁻⁷ 10⁻⁸ 10⁻⁹ 10⁻¹⁰ 10⁻¹¹ 10⁻¹²

Figura 3.

Ma qual è, fra questi, il limite dell'occhio umano? Proviamo a scoprirlo procedendo per gradi e con esempi pratici. A tutti, sulla spiaggia, è capitato di concentrarsi su una manciata di sabbia per cercare di scorgere ogni singolo granello; ebbene la sabbia si definisce materia granulare della misura da 2.00 mm a 0.06 mm (cioé fino a 60 micrometri), quindi i micrometri (milionesimi di metro, µm) sono alla nostra portata

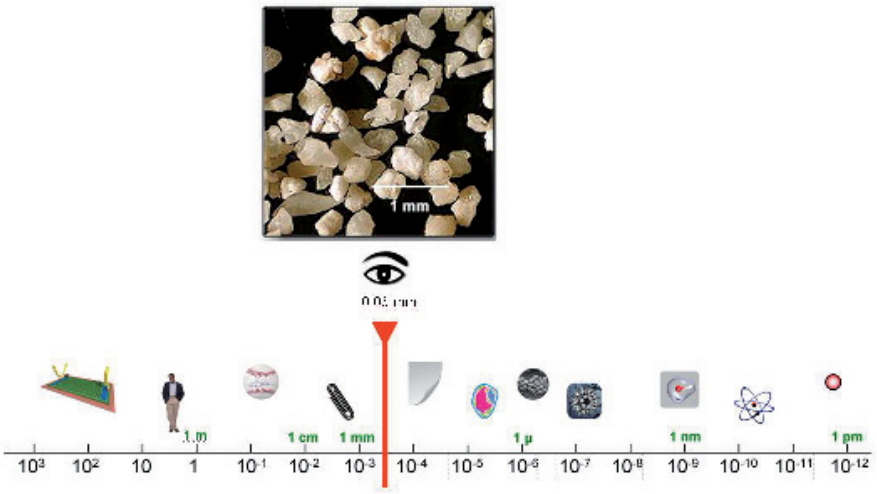


Figura 4.

Cosa succede però se osserviamo da vicino della sabbia di fiume (il limo)? Riusciamo probabilmente a scorgere delle particelle, ma la vista ad un certo punto si confonde. Il limo si definisce come materia granulare della misura da 0.060 mm fino a 0.004 mm (cioé fino a 4 micrometri), quindi possiamo dire che le decine di micrometri sono il limite massimo cui possiamo arrivare ad occhio nudo.

A questo punto la tecnologia ci viene in aiuto con una scoperta che ha cambiato il modo di osservare la natura, il microscopio. Questo, tramite un sistema di lenti ottiche, ingrandisce gli oggetti invisibili ad occhio nudo fino a renderli a disponibili alla nostra vista. Anche il microscopio ha un limite, però, che è determinato dall'uso della luce visibile. Noi vediamo gli oggetti perché riflettono la luce che li colpisce, ed è questa che noi percepiamo. Siccome il nostro occhio «vede» solo la luce del campo del visibile, essa è il fattore limitante. Se consideriamo che la lunghezza d'onda media della luce visibile è 0.55 micrometri, la fisica ci dice che non possiamo vedere oggetti inferiori alla metà di essa, cioè 0.275 micrometri, nemmeno con un microscopio, che non fa altro che «ingrandire» l'immagine data dalla luce visibile. Questo ci permette comunque di arrivare a vedere oggetti piccoli come cellule o batteri.

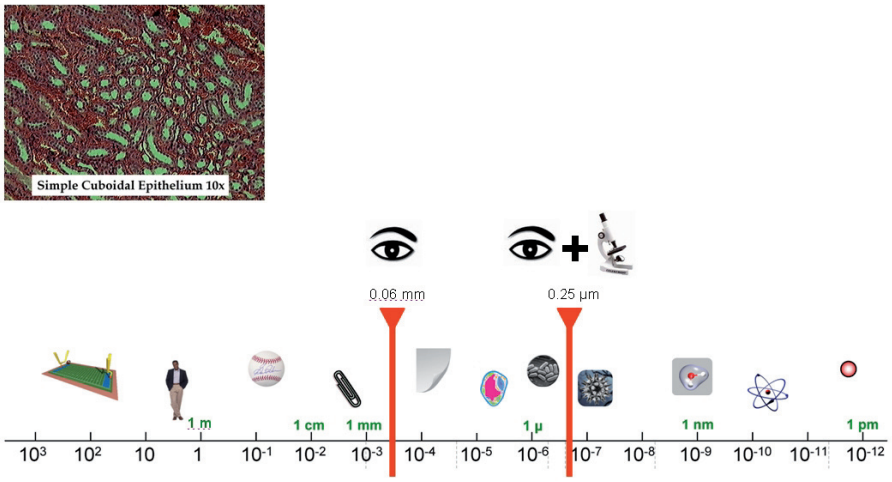


Figura 5.

Sì può oltrepassare questo limite dato dalla luce visibile? Certo, basta utilizzare una lunghezza d'onda più corta, che sia dell'ordine di grandezza degli oggetti da osservare. Ad un prezzo però, non potremo più vedere gli oggetti direttamente, perché la nostra natura ci rende impossibile percepire con gli occhi le radiazioni inferiori al visibile, come i raggi ultravioletti. Saremo costretti quindi a ricostruirci una immagine virtuale degli oggetti osservati.

La soluzione più comune è utilizzare gli elettroni, tramite un apposito microscopio (detto appunto a trasmissione elettronica) ad una lunghezza d'onda di 1.23 nanometri (miliardesimi di mm, nm), che, per quanto detto a proposito del microscopio ottico, ci offrono una risoluzione di ca. 0.6 nanometri, sufficienti a visualizzare piccole molecole

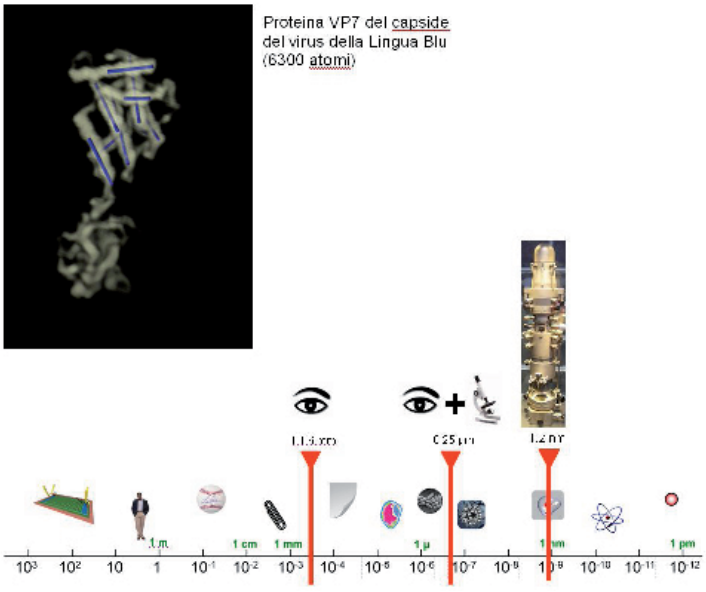


Figura 6.

Scendendo ulteriormente, alla lunghezza d'onda dei raggi-X, di solito 0.15 nm, è possibile individuare i singoli atomi.

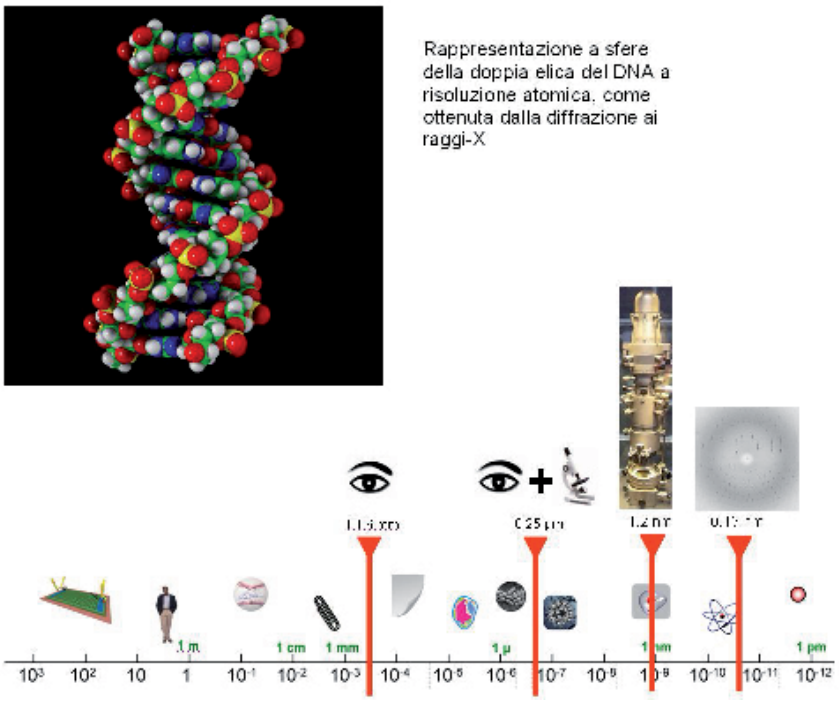

Rappresentazione a sfere della doppia elica del DNA a risoluzione atomica, come ottenuta dalla diffrazione ai raggi-X
1 m
1 cm
1 mm
1 µ
1 nm
1 pm
10³ 10² 10 1 10⁻¹ 10⁻² 10⁻³ 10⁻⁴ 10⁻⁵ 10⁻⁶ 10⁻⁷ 10⁻⁸ 10⁻⁹ 10⁻¹⁰ 10⁻¹¹ 10⁻¹²

Figura 7.

È questa la tecnica usata da Watson e Crick negli anni '50 che permise di scoprire la doppia elica del DNA, tecnica oramai perfezionata che permette di ricostruire la struttura delle molecole fino al dettaglio atomico.

Tornando alle nostra domanda iniziale, possiamo quindi dire che non con l'occhio umano, ma con l'ausilio della tecnologia e della grafica virtuale, è possibile osservare il mondo degli atomi, permettendoci di investigare i meccanismi della vita a livello delle molecole.

NOTE

[1] Per esempi di nuovi strumenti informatici finalizzati all'insegnamento delle scienze biologiche si veda: http://www.sienabiografix.com/index_sci.php.

BIBLIOGRAFIA

[1] Jian Qing Yu, David J. Brown and Ellen E. Billet. Development of a Virtual Laboratory Experiment for Biology; *Europen Journal of Open, Distance and E-Learning*, 27/09/05.

Archimede in città

Alberto Alberti

Coordinatore scientifico di 'Città educativa', Roma

1. Le premesse

La scuola ci ha abituati a tenere ferma una linea di separazione tra il 'sapere', per definizione appartenente in esclusiva alle strutture deputate a elaborarlo e trasmetterlo (scuola e università), e la condizione di 'assenza di sapere' , anche questa per definizione caratterizzante la società esterna. Da lì gli 'alfabeti', da qui gli 'analfabeti', nettamente distinti tra loro.

Nella società dell'informazione e della multimedialità, questa rappresentazione non ha più senso. Nella vita di tutti i giorni, in una città come Roma, capita facilmente di imbattersi in situazioni, fatti, fenomeni e problemi che presentano frammenti più o meno estesi e organizzati di saperi disciplinari, simili alle materie di studio scolastico. Non solo arte e storia, lingua e letteratura, problemi economici e sociali, ma anche matematica, scienze, studi naturalistici e ambientali.

Centrali di elaborazione e di diffusione di conoscenza se ne trovano disseminate nei luoghi più diversi e improbabili del tessuto sociale, dalla tv, al cinema, all'edicola sotto casa, ma anche dall'agenzia di viaggi all'associazione di solidarietà con il terzo e quarto mondo, dalle varie forme di volontariato e di accoglienza verso gli immigrati, ai punti di vendita del commercio equo e solidale.

Qualcuno, per tener ferma e legittimare l'antica linea di demarcazione, chiama in soccorso l'organizzazione disciplinare che garantirebbe una sorta di supremazia conoscitiva all'apprendimento scolastico. Ma, se si guardano le cose senza pregiudizio, appare problematico stabilire una gerarchia di valore tra il disciplinare scolastico e tutto il resto, se in questo 'tutto il resto' mettiamo il sapere organizzato che è richiesto da un progetto di produzione anche artigianale, o quello necessario per la gestione di un esercizio commerciale, un'officina di riparazioni meccaniche, un laboratorio tecnologico, un'impresa, ecc., e senza sottovalutare l'impegno sistematico che richiedono anche attività più 'leggere' come l'organizzazione di un viaggio in comitiva, la partecipazione a gare sportive o quiz televisivi, l'uso di strumenti telematici per la quotidianità, la stessa fruizione di servizi essenziali alla vita di ogni persona – per non parlare di imprese più ampie e magari eccezionali, come un gran premio di formula uno o un festival della poesia.

Non meno problematico appare, sull'altro versante, cioè quello del classico sistema delle discipline, identificare unanimemente e senza ambiguità, contenuti e struttura

di ognuna di esse. Ne abbiamo avuto alcune prove esemplari in questi ultimi anni, per esempio quando docenti universitari titolari di cattedre si trovarono a discutere animatamente, su campi contrapposti, sostenendo o negando il valore epistemologico delle indicazioni che le varie commissioni ministeriali volevano dare ora per l'insegnamento della storia (ai tempi del ministro De Mauro) ora per quello delle scienze (ai tempi del ministro Moratti).

Perfino la possibilità di distinguere tra alfabeta e non-alfabeta sta diventando incerta. Ognuno sa qualcosa e nessuno sa tutto, senza che il 'qualcosa', in ogni caso, possa essere collocato in una linea sequenziale quantitativa rispetto al tutto. Voglio dire: non c'è un rapporto necessario di crescita lineare da quello che uno sa a quello che tutti gli altri sanno. Persone che stentano nel leggere e nello scrivere, intendono perfettamente e parlano correntemente lingue straniere, mentre i diplomati di un liceo classico non sanno farlo. Persone illetterate maneggiano con grande facilità strumenti digitali, audiovisivi, mentre grandi conoscitori di letterature di tutti i paesi ignorano elementari formule matematiche e principi scientifici, entrando in crisi appena si tratta di far funzionare un elettrodomestico di terza o quarta generazione.

Se riportiamo tutti questi fenomeni al mondo giovanile e scolastico, troviamo che nessun ragazzo o bambino ha un solo canale da cui ricevere conoscenze e stimoli a conoscere. Non è solo la scuola che li spinge a costruirsi saperi forti, non empirici. Una miriade di input culturali e ideali li bombardano 24 ore su 24, presentandosi (o essendo percepiti dagli interessati) come fonti degne di essere poste allo stesso livello o magari più in alto dell'insegnamento scolastico. La potenza cognitiva dei messaggi appare perfino uguale se non maggiore di quella che offre il mondo delle discipline, nel senso che ognuno di questi messaggi, singolarmente o in associazione con altri, presenta un tasso di astrazione e di organizzazione concettuale che impegna l'attività mentale a livelli di raffinatezza e di profondità ugualmente importanti.

2. Archimede in città

Da premesse simili a quelle accennate è nato nella primavera del 2005, su proposta di chi scrive, il progetto *Archimede in città* dell'Assessorato alle politiche educative e scolastiche di Roma.

Archimede nella Roma di oggi non si limiterebbe, se la leggenda ha un suo fondamento, all'acqua del bagno pubblico che lo spinse ad andare nudo per le strade di Siracusa gridando 'EUREKA'. Troverebbe argomenti e materiali per fare ricerche e scoperte in molti campi e direzioni, per esempio considerando i servizi pubblici o l'energia consumata, i flussi demografici o il traffico stradale, il mercato e il sistema dei prezzi o le forme delle strade e dei palazzi, i materiali usati o l'aria che respiriamo; e costruirebbe percorsi di studio pluridisciplinari che possono interessare, contemporaneamente o separatamente, le discipline insegnate a scuola.

Ipotizziamo che sia possibile collocare questi percorsi, in particolare, in quattro domini cognitivi:

1. il dominio della matematica, anzi, delle matematiche;
2. il dominio della chimica e/o della fisica;
3. il dominio delle scienze naturali/biologiche;
4. il dominio degli studi ecologici e ambientali.

Su tale ipotesi, invitiamo i docenti a organizzare l'insegnamento disciplinare in modo tale che l'esperienza ordinaria degli allievi nella città, e in particolare le attività emotivamente a loro vicine (che perciò possono essere più motivanti), diventino il punto di partenza e il contenuto stesso di uno studio che porta ai saperi disciplinari.

Naturalmente, ciò implica che il docente padroneggi e metta in campo competenze professionali particolari, nuove rispetto al passato, non puramente disciplinari né puramente sociorelazionali, collocabili a un punto di intersezione alto di almeno tre assi: quello delle conoscenze curriculari dure e certe, quello delle conoscenze esistenziali complesse e dinamiche, e quello dei motivi culturali attinenti alla vita dei giovani (le varie manifestazioni della 'cultura giovanile').

Punto di riferimento è il fatto che nessuno sa tutto e ognuno sa qualcosa di suo che è degno di essere apprezzato (fornito di valore), di modo che modalità di pensiero molteplici e variegate sono tutte contemporaneamente validi/rilevanti e, anzi, hanno un grado di validità che merita di essere riconosciuto adeguatamente.

3. Il progetto

Gli istituti che intendono partecipare al progetto Archimede in città sono chiamati a presentare un piano di ricerca secondo le indicazioni procedurali emanate di anno in anno. Debbono proporsi di costruire e/o consolidare conoscenze disciplinari in uno o in più dei quattro domini indicati, prendendo le mosse da esperienze di vita cittadina e da problematiche del territorio, psicologicamente vicine a bambini, ragazzi e giovani, prevedendo, accanto a e prima dello studio teorico, attività di tipo operativo e pratico (ricerche ambientali, laboratori, studi di materiali, ecc.) in funzione motivante, suscitatrice di curiosità cognitive e di interessi concreti.

Si tratta di individuare percorsi di ricerca e di studio che, per arrivare alle conoscenze più formalizzate delle discipline matematiche e scientifiche, non solo prendano avvio dai reali interessi degli studenti, ma comportino anche l'impiego di metodologie attive, osservazioni della realtà urbana, indagini, esplorazioni, individuazioni di fonti informative e acquisizione di documenti, raccolte di dati, elaborazioni e approfondimenti, assunti non come fatti empirici ma come oggetto di riflessione critica e di apprendimento. Tutto questo è costantemente collegato all'utilizzazione di laboratori scientifici, strumenti informatici e tecnologie multimediali, e alla ricerca di collaborazioni altamente specialistiche che le strutture e i centri culturali del territorio possono offrire.

Una apposita Commissione esamina le richieste, valuta i progetti e compila una graduatoria distinta per grado scolastico (elementare, media e secondaria superiore).

Alle scuole che risultano collocate nei primi posti delle rispettive graduatorie viene erogato un contributo di max 2000 euro ciascuna.

Oltre a tale finanziamento, l'Assessorato accompagna i progetti prescelti con un'azione permanente di sostegno e consulenza realizzata attraverso la struttura di *Città educativa*. Si vuole così rendere più agevole il collegamento tra le varie realtà scolastiche, favorire la ricerca e la canalizzazione di contributi scientifici specialistici, garantire l'informazione sui percorsi ritenuti più funzionali, lo scambio delle migliori esperienze didattiche, la documentazione e la diffusione dei prodotti realizzati.

Nel primo anno di esperienza (2005/2006) sono stati ammessi al finanziamento 38 progetti di cui 18 presentati da scuole secondarie di secondo grado, 10 da scuole primarie (direzioni didattiche o istituti comprensivi) e 10 da scuole secondarie di primo grado (scuole medie e istituti comprensivi).

Nel corso dell'anno, gli alunni delle scuole elementari e medie hanno avuto la possibilità di prendere parte ad almeno quattro attività laboratoriali organizzate a Città educativa e animate da operatori culturali di strutture cittadine non propriamente 'scolastiche' (dal CNR all'Università, dall'APAT a Roma Energia, da Città del Sole a Roma Natura, ecc.).

A conclusione dei progetti, in una serie di incontri svoltisi a Città educativa in tre settimane (due a maggio e una a settembre 2006), le scuole hanno presentato a un pubblico di insegnanti ed esperti i loro lavori.

Le discussioni tra gli autori delle ricerche e gli 'amici critici' che ne apprezzavano il valore e davano consigli per realizzare miglioramenti e sviluppi, costituiscono un aspetto rilevante di tutto il progetto.

4. Le tematiche e le scelte didattiche

A Massa, nell'ambito del progetto 'Pianeta Galileo' 2006 ho presentato, con l'ausilio di una serie di diapositive, parte del lavoro svolto nell'anno 2005/06. Ho illustrato esempi di ricerche sull'energia, la chimica, il metabolismo, la struttura geologica del territorio, ecc. Si è trattato sempre di percorsi didattici che scaturiscono da un problema sentito dai ragazzi e mirano a realizzare conoscenze e competenze che, mentre rientrano a pieno titolo nel sistema delle discipline, appaiono funzionali alla soluzione del problema stesso (come una 'disciplina di scopo'). In diversi casi, la necessità di trovare energie alternative, magari per illuminare il proprio liceo e per riscaldare l'acqua dei bagni, o per risparmiare sui consumi, porta a costruire piani di indagini che coinvolgono tutti gli aspetti fisici ed economici dell'impresa. In altre scuole l'interesse suscitato dall'allarme sull'inquinamento idrico o atmosferico, apre la pista a studi di natura chimica e biochimica sulle acque dei fiumi (il Tevere, l'Almone), sull'aria delle nostre piazze, sui cibi che mangiamo, ecc.. La curiosità cognitiva destata dai materiali litici del Foro Romano, o di altri complessi monumentali cittadini, ha indotto a scoprire la natura geologica della regione. Altrove è l'osservazione dei danni ai gerani di un balcone a spingere verso studi sulla vita delle piante e degli insetti, loro amici (per la

riproduzione) e nemici (per i danni che provocano).

Insomma, il panorama è vasto e non è possibile descriverlo tutto. Approfondimenti, descrizioni ed esempi si possono trovare sul sito www.citteducativa.roma.it

Del resto non sono gli episodi che contano ma piuttosto le scelte didattiche e pedagogiche che abbiamo cercato di perseguire e che si basano tutte sulla presa d'atto del rapporto vitale esistente tra «conoscenza organizzata» dalle discipline scolastiche e «conoscenza vissuta» nell'esperienza quotidiana del mondo.

Riassumendo possiamo dire:

- La nostra realtà è fortemente regolata da fatti e fenomeni culturali, anche negli aspetti più minuti e oscuri della vita quotidiana (dall'uso di un detersivo alla prenotazione di un viaggio, dalla fabbricazione di un'auto all'allestimento di una festa paesana). Non solo la distanza tra ricerca di base e ricerca applicata tende a diminuire velocemente, ma la ricerca applicata tende anche a proporsi come ricerca di base.
- Non esiste più un confine netto tra 'alfabetismo' come portato specifico della scuola, e 'analfabetismo' come caratteristica del mondo esterno. Anzi, a differenza di quanto avveniva nel passato, i saperi che si apprendono fuori della scuola (e, magari, meglio che nella scuola) sono sempre più numerosi e sempre più scientificamente fondati.
- Il sapere diffuso è 'potente'. Se è vero che il sapere scolastico vanta dei capisaldi 'forti', base nobile e tradizionale della conoscenza organizzata del mondo nelle 'discipline', non è men vero che il sapere diffuso ha oggi 'suoi' capisaldi, altrettanto 'forti' sebbene afferenti a una diversa forma di organizzazione gerarchica. L'insegnante, se non vuole fallire nel suo compito, non può chiudere gli occhi su questa diversa organizzazione del sapere. Prima di mettere mano all'insegnamento della sua disciplina, deve andare a cercare, nell'esperienza del mondo che hanno i suoi alunni, anzi nella filigrana di quella esperienza, tutte quelle conoscenze che incrociano in qualche maniera, anche minimale, i saperi disciplinari. Deve identificarle come strumenti delle discipline e valorizzarle nel piano della sua didattica.
- In tale contesto incontriamo sempre più spesso argomenti di interesse e di studio che si configurano come nuove e speciali 'discipline', precisamente come 'discipline di scopo', capaci di canalizzare e finalizzare numerosi altri saperi (scolastici e no), in una sintesi che si apre a una nuova visione del mondo.
- Finalizzando lo studio scolastico alla costruzione di simili aggregati disciplinari, la scuola, come istituzione complessiva, ha la possibilità di diventare un soggetto pensante. Ovvia la necessità di coinvolgere non solo tutta una classe o tutta una scuola, ma anche la comunità sociale e scientifica, marcando in

ogni caso le diverse funzioni e la portata dei rispettivi contributi (rendere sempre riconoscibili i compiti e i ruoli di ciascuno, dall'esperto esterno, all'insegnante, al gruppo di lavoro, al singolo studente).

- Va infine dato il giusto valore formativo alla prospettiva di realizzare 'prodotti' osservabili e valutabili da portare a un pubblico controllo, magari attraverso una semplice esperienza di presentazione in una struttura diversa dalla scuola (come, per esempio, Città educativa). La visibilità pubblica, infatti, costituisce un importante fattore di motivazione e dà allo studente l'opportunità di riflettere concretamente sui suoi processi di apprendimento e sul suo stile di lavoro, in riferimento ai risultati previsti o conseguiti.

Del resto, partecipare a un progetto socialmente apprezzato (cioè sostenuto a livello politico e amministrativo da un Assessorato e da un Dipartimento comunale), e con l'onere di dare conto del lavoro svolto, significa instaurare e far crescere un clima attivo e partecipativo, promuovere la socializzazione, la cittadinanza responsabile, l'impegno civico.

La matematica in cucina: dal libro allo spettacolo

Angelo Savelli

Regista stabile della compagnia 'Pupi e Fresedde', Teatro di Rifredi, Firenze

Lo spettacolo *La matematica in cucina* nasce all'interno delle sale del Giardino d'Archimede, «museo per la matematica» di Firenze, una struttura unica in Italia, che fin dal suo nascere si è adoperata per promuovere un approccio nuovo, vitale e anche gioioso a questa disciplina tanto rigorosa da sembrare quasi disumana, mentre invece è una piacevole compagna - più o meno palese - delle più svariate attività umane, da quelle più utilitaristiche come le costruzioni architettoniche a quelle più effimere come i giochi con le bolle di sapone.

Proprio la compagnia Pupi e Fresedde – Teatro di Rifredi realizzò nel 2004, in occasione della sua inaugurazione, uno spettacolo itinerante per le varie sale del Museo, tratto da un piacevolissimo ed originale romanzo del matematico greco Apostolos Doxiadis *Zio Petros e la congettura di Goldbach*, che aveva come protagonisti i Numeri Primi, una loro misteriosa proprietà ancora irrisolta, un vecchio zio scorbutico, un nipote intraprendente e il catastrofico incontro con la Teoria dell'Incompletezza di Gödel.

Forse a causa dell'originalità della proposta, forse per una penuria nel nostro panorama teatrale di qualificate occasioni d'incontro con i temi scientifici, fatto sta che da allora questo spettacolo sta ancora girando su tutto il territorio nazionale, accolto sempre con grande successo e con grande stupore nel vedere trattata con tanta ironia e pertinenza una materia così ostica.

A distanza di due anni si è dunque deciso di rinnovare il connubio tra Teatro e Matematica e tra Pupi e Fresedde e il Giardino d'Archimede. Questa volta la scelta è caduta su un libro, fresco d'edizione, scritto proprio da Enrico Giusti, il direttore del museo. Ancora una volta un'opera curiosa ed originale dove la matematica si diverte ad apparire, come un folletto a volte dispettoso ed a volte rassicurante, nelle più impensate pieghe delle attività quotidiane di una banale giornata gastronomica di due simpatici giovanotti, costretti dalla loro condizione di scapoli a condividere due camere con cucina nei pressi dell'Università.

A sottolineare la brillantezza e l'ironia con cui la materia vuole essere trattata i due giovanotti sono identificati con i soprannomi di due divertenti comici americani degli anni '40, Gianni e Pinotto. Questo incipit narrativo è, nel libro, il pretesto per una serie di digressioni, a volte inaspettate, a volte spassose, sempre rigorose, che non riguardano solo la matematica, ma anche la storia della matematica e della scienza, la filosofia, la cultura in generale ed anche, evidentemente, la «scienza culinaria».

Proprio per questo suo taglio particolare, per questo ricondurre tutta l'esposizione dei contenuti scientifici ai dialoghi dei due personaggi, per la ricchezza e l'eterogeneità degli spunti e per l'intento programmaticamente divulgativo, non è stato troppo difficile – per quanto molti lo ritenevano improbabile – ricavare uno spettacolo teatrale da questo libro.

Evidentemente lo spettacolo non è il libro.

Si sono presi alcuni spunti tra quelli più significativi e più teatralizzabili, riadattandoli al linguaggio ed ai tempi della rappresentazione scenica, sperando di creare nello spettatore la curiosità e la voglia di approfondire gli stimoli offerti con una successiva e più approfondita lettura del libro.

Per quanto possa sembrare irriverente, nello spettacolo la materia scientifica è stata trattata come un vero e proprio *cabaret* matematico/culinario. Modificando leggermente la tipologia dei due personaggi del libro, si è creata una vera e propria coppia comica come nella migliore tradizione del varietà e dell'avanspettacolo, con il comico e la spalla, l'Augusto e il clown bianco, affidando questi ruoli ad un esilarante ed affermato cabarettista come Andrea Muzzi spalleggiato da un brillante ed efficace Andrea Bruno Savelli.



Figura 1 - Fra pentole e fornelli, Gianni e Pinotto si preparano un piatto di spaghetti (dallo spettacolo 'La matematica in cucina').

Con queste premesse si è potuto realizzare uno *spettacolo per tutti*. Nel senso che ne è risultato uno spettacolo, molto divertente e non banale, per gli spettatori di tutte le età che amano il teatro e l'intrattenimento intelligente, ma al tempo stesso questa proposta si è dimostrata particolarmente idonea per essere recepita dagli studenti sia delle medie inferiori che degli istituti superiori. In tutte e due i casi il nostro intento e la nostra speranza non è certo quello d'insegnare la matematica a nessuno, quanto piuttosto di contribuire ad incuriosire qualcuno o quantomeno ad abbattere un po' di pregiudizi verso questa disciplina così essenziale nella nostra vita di tutti i giorni e – a guardarla bene - anche bella e divertente.

Passando dal libro alla scena, la vicenda ideata da Enrico Giusti ha dovuto necessariamente subire degli inevitabili e pesanti tagli finalizzati alla concentrata brevità

dello spettacolo rispetto alla distesa ampiezza del libro. Inoltre sono state apportate alcune piccole modifiche – come l'inversione dei nomi tra matematico e letterato in funzione degli attori che l'impersonavano – che però, anche a detta dell'autore, non ne hanno snaturato il senso. Infine vanno segnalate anche una serie di piccole aggiunte nate sia dalle necessità drammaturgiche del racconto scenico ma anche dalle divertenti improvvisazioni degli attori.

A seguito di questo minuzioso *lifting scenico*, questa è diventata la vicenda della *Matematica in cucina*.

Gianni è un giovane matematico lontano dallo stereotipo del secchione con la testa tra le nuvole. Di bell'aspetto, brillante, sportivo, donnaiolo e sfaticato vive alle spalle del coinquilino Pinotto, un letterato un po' sfigato con la passione della cucina e dell'ordine. Al ritorno dalla spesa al supermercato, Gianni intraprende una discussione con l'amico per sostenere la superiorità della matematica rispetto alla letteratura e per convincere l'incredulo Pinotto gli dimostra come tutta la cucina nasconda trabocchetti matematici.

Si comincia con un'operazione semplicissima: aprire il rubinetto dell'acqua. Il restringersi del getto d'acqua del rubinetto offre l'occasione per una dimostrazione sul perché e di quanto stiano in proporzione la velocità e la larghezza. Pinotto ha previsto di cucinare delle sane patate lesse che poco attirano il goloso Gianni. Il quale, in cambio di evitargli una serie di passaggi matematici, saltando subito ai risultati finali della dimostrazione, ottiene che si passi alla preparazione di ben più appetitosi spaghetti al pomodoro. Ma il demone matematico di Gianni non è facile da domare e mentre Pinotto cerca di aprire un barattolo di pelati, ecco irrompere prepotentemente una bella dimostrazione sul funzionamento della leva. Gianni dimostra che la cucina è piena di leve, dalle mollette alla stadera, e non riesce a trattenersi dall'esporne la formula. I patti sono patti e Pinotto archivia lo spaghetto per tornare alla patata lessa. Dopo una ruffiana contrattazione si arriva al compromesso di una teglia di patate arrosto.



Figura 2 - Gianni e Pinotto discutono perché il getto d'acqua che esce dal rubinetto si restringe scendendo verso il basso (dallo spettacolo 'La matematica in cucina').

Si procede così ad una gara di sbucciatura di patate: chi perde lava i piatti. Pinotto crede di avvantaggiarsi prendendo di nascosto le patate più piccole. Ma vince Gianni che dimostra, matematicamente e con l'aiuto di un cubo smontabile, la differenza tra volume e superficie che ha condotto Pinotto a perdere scegliendo le patate piccole. Dalla grandezza delle patate da sbucciare al perché il rollè cuocia prima dell'arista il passo è breve, ma la dimostrazione dovrà passare per un curioso percorso che partendo dalla differenza tra uno scaldabagno ed un radiatore, riguarderà anche serpenti, volpi ed lo stesso Pinotto alle prese con il freddo invernale e la calura estiva. Con tutti questi discorsi di mangiare non se ne parla. Si decide dunque di farsi almeno un bel caffè che Gianni chiede di accompagnare con un paio di ciambelle.

Finalmente Pinotto può ridiventare protagonista e il principe del cipollotto si esibisce in una divertente lezione di cucina spiegando le semplici ma ferree leggi con cui si deve preparare una buona insalata ed un buon caffè. Ma la presenza sul tavolo dei mucchietti conici di zucchero, farina e caffè mette di nuovo in moto l'irrefrenabile spirito speculativo di Gianni che si appresta a dimostrare ad un annichilito Pinotto le proprietà angolari dei vari materiali granulari finendo a parlargli delle Piramidi d'Egitto. E così i due amici escono digiuni dalla cucina riprendendo la loro accesa discussione sulla supposta superiorità della matematica sulla letteratura.

Film fantastici e mondi possibili

Andrea Sani

Liceo Scientifico 'Leonardo da Vinci', Firenze

1. È possibile un pensiero per immagini?

Il rapporto tra cinema e filosofia può essere affrontato da due punti di vista diversi: dal punto di vista dell'*estetica cinematografica* e dal punto di vista della *filosofia del cinema*. L'estetica cinematografica analizza e valuta filosoficamente il cosiddetto 'linguaggio cinematografico', cioè quegli elementi linguistici che sono caratteristici del cinema e che lo differenziano dalle altre forme d'arte, come l'uso delle inquadrature, il movimento, il montaggio, ecc. Testi-chiave di questa impostazione filosofica sono i due libri di Gilles Deleuze, *Cinema 1. L'immagine-movimento* (1983) e *Cinema 2. L'immagine-tempo* (1985)[1]. Invece, la filosofia del cinema consiste nel ricercare in un film la presenza di classiche problematiche della storia della filosofia. È questa la prospettiva di indagine che assumeremo in questa sede, e che è esemplificata anche nel recente saggio di Julio Cabrera, *Da Aristotele a Spielberg. Capire la filosofia attraverso i film* (1999), e in quello di Umberto Curi, *Lo schermo del pensiero. Cinema e filosofia* (2000)[2].

Naturalmente, la domanda fondamentale che nasce in chi si pone da questo punto di vista è la seguente: ma la filosofia può davvero esprimersi attraverso immagini? Esiste, cioè, la possibilità di un pensiero che sia distinto da quello discorsivo?

Una tradizione filosofica che in ultima analisi risale a Platone sembra escludere il valore filosofico delle immagini. I pensatori 'platonici' sostengono che la filosofia non ha alcun bisogno di figure sensibili: la metafisica consiste nel cogliere, al di là delle apparenze visibili, una realtà invisibile e astratta, quella delle idee. La conoscenza filosofica non richiede gli occhi del corpo, ma esclusivamente l'uso degli occhi della mente. Platone stigmatizza, per esempio, il cinico Antistene che ha gli occhi del corpo per vedere il cavallo, ma non ha gli occhi della mente per vedere la «cavallinità», cioè, la realtà invisibile dell'idea.

Nel VII libro della *Repubblica*, Platone descrive una sorta di primitiva 'sala cinematografica'. Nel racconto mitico, Platone immagina che alcuni schiavi siano incatenati, sino dall'infanzia, in una caverna sotterranea e che siano costretti a vedere solo il fondo della caverna. Su questo fondo vengono proiettate le ombre di piccole statue. I prigionieri, che non hanno mai visto altro, vedono le ombre e pensano che questa sia la realtà. La situazione dello schiavo dentro la caverna rappresenta metaforicamente la conoscenza sensibile, che si attua grazie alle immagini dei sensi. Quella sensibile, però, a giudizio di Platone, è una conoscenza ancora imperfetta. Il vero filosofo è colui che non

guarda più le ombre proiettate nel buio della caverna (cioè le immagini) ma che esce all'aria aperta e conosce direttamente le cose, le quali, nel mito, simboleggiano le idee. Un filosofo platonico, dunque, ci inviterebbe oggi a uscire dal cinema (corrispondente alla caverna platonica), cioè, a *rifiutare* le immagini per rivolgerci direttamente verso le idee.

Una corrente filosofica diversa da quella platonica – e che si può far risalire ad Aristotele – critica la trascendenza delle idee e rivaluta la dimensione sensibile e con essa il mondo delle immagini, delle rappresentazioni e dell'arte.

Platone condanna l'arte figurativa perché considera le immagini sensibili della pittura e della scultura «imitazioni di imitazioni», cioè copie della realtà sensibile, a sua volta riproduzione sbiadita del mondo delle idee. Stando all'esempio formulato da Platone, un letto dipinto non è che la copia del letto sensibile, il quale è già una copia dell'idea del letto. Dunque le arti figurative non ci fanno conoscere alcuna verità, sono soltanto ingannatrici, come lo è la poesia (epica o lirica, tragica o comica), che imita le azioni e i sentimenti umani.

Aristotele, invece, nella *Poetica* rivaluta l'arte: anche per lui le immagini degli artisti sono imitazioni (*mìmesis*), ma non in senso passivo, bensì in senso creativo, in quanto rappresentano non ciò che è realmente accaduto (come fa la storia), ma ciò che può accadere, ossia il verosimile, il possibile. L'arte, infatti, imita le cose che possono succedere a chiunque si trovi nelle circostanze considerate. La tragedia greca, per esempio, descrive personaggi che, pur essendo singoli individui, diventano tipi esemplari di comportamenti o caratteri, e come tali universali. I protagonisti delle tragedie, quali Edipo o Antigone, oltre a essere individui particolari, sono anche simboli che vengono fatti agire «in corrispondenza alle leggi della verosimiglianza o della necessità»[3]. L'arte, dunque, secondo Aristotele, è in grado di rappresentare un oggetto universale non per mezzo di concetti, cioè di nozioni universali, *come fa la scienza*, ma per mezzo di immagini, che sono rappresentazioni individuali.

2. Il cinema pensa?

In generale, alla concezione platonica che denigra la conoscenza per immagini, si può obiettare che talvolta le figure sensibili possono aiutare a capire anche il pensiero astratto. Per esempio, la variazione di una grandezza può essere compresa meglio con l'ausilio di un grafico, cioè tramite l'immagine di una curva, che attraverso una serie di cifre. Ma anche i cerchi usati dal matematico Eulero sono molto utili per visualizzare i ragionamenti di tipo sillogistico, dato che con le loro reciproche posizioni rappresentano graficamente relazioni fra classi.

D'altra parte, l'utilizzo di figure è stato spesso sfruttato dai filosofi per far comprendere teorie molto difficili ai non filosofi. Lo stesso Platone, che pure ritiene imperfetta la conoscenza sensibile, nei suoi dialoghi ricorre spesso ai «miti», che sono, in fondo, immagini mentali. Si pensi, per esempio, al mito della biga alata nel *Fedro*, che simboleggia la concezione dell'anima umana divisa in tre facoltà: l'anima irascibile

(simboleggiata dal cavallo bianco), quella concupiscibile (simboleggiata dal cavallo nero) e quella razionale (simboleggiata dall'auriga).

In realtà, pensare consiste nel mettere in rapporto le idee attraverso simboli che le rappresentano. Questi simboli possono essere parole, ma anche – perché no? – figure in movimento. A tale riguardo, già Leibniz, in uno scritto del 1677, intitolato *Dialogo*, asseriva che «I pensieri possono prodursi anche senza vocaboli», precisando, però, subito dopo, «ma non senza altri segni»[4]. Nulla vieta che questi segni siano appunto i piani e le sequenze cinematografiche, correlati fra loro in modo creativo dal montaggio, inteso come vera e propria *sintassi* filmica[5].

Anche il cinema, quindi, attraverso le sue immagini può mettere in gioco problemi astratti e complesse questioni filosofiche. Non è detto, però, che soltanto i film molto dialogati, teatrali, possiedano una valenza speculativa. Persino una pellicola 'spettacolare' destinata al grande pubblico è in grado di esprimere un messaggio filosofico. Alcuni film fantastici o di fantascienza, per esempio, nel descrivere fenomeni insoliti o straordinari, alludono – consapevolmente o inconsapevolmente – alle problematiche dei filosofi. Per inciso, va precisato che è possibile rilevare la presenza di teorie filosofiche anche in pellicole che in nessun modo si sono proposte esplicitamente di trattarle. Infatti, come osserva Umberto Eco, un testo (e quindi anche un film) è una «macchina per generare interpretazioni», al di là delle stesse intenzioni dell'autore[6].

In particolare, alcuni film fantastici riescono a visualizzare i cosiddetti *esperimenti mentali* (o ideali, *Gedankenexperimente*), cioè quelle esperienze che in pratica non si dimostrano fattibili, ma che si ipotizzano per avanzare spiegazioni dei fatti ordinari che a un esame superficiale possono apparire non problematici (come, per esempio, il numero delle dimensioni).

3. Esperimenti mentali

Il concetto di *esperimento ideale*, in realtà, è introdotto in un contesto scientifico e risale a Galileo Galilei, se non addirittura ad Archimede. Tale tipo di esperimento consente agli scienziati di sfuggire alla concretezza e alla specificità delle situazioni reali, usando, come ha affermato lo stesso Galileo, gli «occhi della mente» e non «gli occhi della testa». Galileo talvolta, non potendo realizzare esperimenti in un laboratorio reale per mancanza di strumenti tecnici adeguati, ricorre a un laboratorio ideale, cioè immaginario, in cui «suppone» l'assenza di forze, «immagina» piani perfettamente levigati, e si «raffigura» il movimento nel vuoto. Sulle orme di Galileo, Albert Einstein propone 'esperimenti impossibili' idealmente condotti alla velocità della luce, i cui risultati, pur non essendo ottenuti sul piano pratico, forniscono utili indicazioni logiche relative a determinate conseguenze fisiche.

Il cinema di fantascienza è in grado di farci vedere – anche con «gli occhi della testa» e non solo con «gli occhi della mente» – degli analoghi esperimenti proposti dalla filosofia che non si possono effettuare nella vita quotidiana. Fra i più insoliti esperimenti mentali visualizzati dai film di fantascienza, si può ricordare, per esempio, quello del

«cervello in una vasca», volto a mettere in dubbio la realtà che ci circonda, e proposto dal filosofo statunitense Hilary Putnam nel libro *Ragione, verità e storia* (1981).

Putnam immagina che uno scienziato pazzo estragga il cervello dal corpo di un uomo, lo ponga in una vasca piena di liquido nutriente e lo connetta a un computer appositamente programmato per simulare la vita corporea. Il cervello continua a credere di avere un corpo e di compiere esperienze, mentre in realtà tutto questo non è che l'illusione dettata dal computer dello scienziato.

A questo punto, Putnam si chiede: chi ci assicura che anche noi non siamo cervelli in una vasca, condannati a illuderci sulla nostra reale situazione? Riaffiora, quindi, in una forma modernizzata, il celebre dubbio scettico proposto anche da René Descartes (Cartesio): chi ci garantisce dell'esistenza di ciò che vediamo, tocchiamo, udiamo? E se ci fosse un genio maligno a orchestrare l'intera nostra esperienza tenendoci nell'inganno? Per vincere questi dubbi, Descartes deve dimostrare l'esistenza di un Dio onnipotente e non ingannatore. Solo sulla veracità e bontà divina si potrà così fondare l'esistenza del mondo esterno e il valore della nostra ragione.

Come ha fatto notare anche il filosofo del linguaggio Diego Marconi, l'ipotesi del cervello in una vasca è stata ripresa nel ciclo cinematografico di *Matrix* (1999 e 2003), diretto dai fratelli Larry e Andy Wachowski, che hanno descritto il destino di un'umanità ridotta a uno stato larvale, e la cui mente è controllata da un gigantesco *computer*, la Matrice, che fa vivere gli uomini in una specie di sogno continuo

4. Concettidea e concettimmagine

Volendo approfondire il discorso sul rapporto cinema-filosofia, si può ricorrere al libro dell'argentino Julio Cabrera, *Da Aristotele a Spielberg. Capire la filosofia attraverso i film*. In questo saggio che ha avuto un notevole successo, Cabrera propone un'interessante categoria utilizzabile per far risaltare il contenuto filosofico di alcuni film: il *concettimmagine*, che contrappone al *concettidea*.

I concettidea sono i concetti astratti tradizionali, presenti nei trattati di filosofia. I concettimmagine, invece, sono immagini (mentali nella letteratura, visive nel cinema), che riescono a rappresentare problematiche universali concernenti il mondo, l'uomo o i valori, garantendo anche un coinvolgimento emotivo e non solo cognitivo. Infatti, i concettimmagine comunicano informazioni e contemporaneamente offrono un'*esperienza viva* delle problematiche affrontate, in modo da generare una forma particolarmente intensa di comunicazione. Per Cabrera, il concettimmagine trasmette conoscenze utilizzando un linguaggio che egli definisce *logopatico*, ossia in grado di raggiungere lo spettatore attraverso l'emozione. Cabrera chiama *razionalità logopatica* una ragione che garantisce una chiave di accesso al mondo fondata sulle emozioni e sulla sensibilità. Anche la letteratura si serve di concettimmagine, ma i concettimmagine del cinema garantiscono una specie di «superpotenziamento» delle possibilità concettuali della letteratura, perché, oltre a servirsi delle parole, utilizzano altri strumenti espressivi dotati di forte impatto emotivo: «È il potere produttivo e riproduttivo dell'immagine

in movimento – afferma Cabrera – a segnare l'aspetto saliente del cinema, nonché il suo tratto distintivo: un qualcosa che è possibile solo grazie alla tecnica della fotografia in movimento. La spazialità e temporalità particolari del cinema, la sua quasi infinita possibilità di montaggio e rimontaggio, d'inversione e spostamento di elementi, la configurazione del suo particolare 'taglio' delle immagini è appunto ciò cha fa la differenza»[7]. Il concettimmagine cinematografico può essere costituito da un intero film, dalle vicende di un personaggio, più raramente da una sola scena o da un solo fotogramma, poiché esso dev'essere capace di attivare nello spettatore un'esperienza emotiva.

All'inizio del suo libro, Cabrera cita come esempio di film in grado di offrire un concettimmagine, *Intolerance* (1916), di David Wark Griffith, che, come risulta dallo stesso titolo della pellicola, traduce in termini cinematografici definiti «impattanti» una riflessione a proposito dell'intolleranza. Il pensatore argentino prosegue poi con una serie di accostamenti tra film e filosofi che ripercorre, in parallelo, la storia del pensiero occidentale e quella del cinema.

5. Vico e gli universali fantastici

La proposta di Cabrera, ritenuta da molti particolarmente «innovativa», ha in realtà un precedente famoso. Infatti, i concettimmagine teorizzati nel libro *Da Aristotele a Spielberg* assomigliano molto agli *universali fantastici* (o *generi fantastici* o anche *caratteri poetici*) di cui parla Giambattista Vico nella *Scienza Nuova* (1725, 1730 e 1744).

Per Vico, che su questo punto riprende la *Poetica* di Aristotele, gli universali fantastici sono immagini poetiche (o fantastiche) che possono rappresentare caratteri tipici (cioè universali) della realtà e della vita: la poesia è espressione di verità, cioè di una visione del mondo, addirittura di una metafisica, sia pure per mezzo di immagini (naturalmente mentali). Gli universali fantastici esprimono caratteri tipici del mondo e della vita, non attraverso un concetto astratto o *universale ragionato* (che corrisponde perfettamente al *concettidea* di Cabrera), ma piuttosto attraverso un ritratto, ossia un personaggio *concreto* e le sue vicende. L'universale fantastico è, insomma, la personificazione o tipizzazione di un contenuto conoscitivo a carattere generale[8]. Per esempio, il personaggio di Achille nell'*Iliade* di Omero è l'universale fantastico che personifica in un'immagine il valore del coraggio e di tutti i suoi attributi, così come il personaggio di Ulisse, nell'*Odissea,* è l'universale fantastico che personifica l'astuzia. Analogamente, secondo Cabrera, *Armonica*, il protagonista (Charles Bronson) del film di Sergio Leone *C'era una volta il West* (1968) è il concettimmagine dello spirito di vendetta[9].

Gli universali fantastici citati da Vico appartengono a opere letterarie, mentre i concettimmagine di cui parla Cabrera sono reperibili in un film. Tuttavia, lo stesso Cabrera ammette che nella categoria dei concettimmagine rientrano anche le immagini (mentali) fornite dalla letteratura: infatti, la letteratura «ha fatto man bassa dei concettimmagine lungo tutta la sua storia», dato che quest'ultima «promuove un'esperienza in chi legge, vi esercita un potenziale emotivo, anch'essa avanza pretese di

verità e universalità»[10] e sviluppa concetti su un piano *metaforico*, proprio come sostiene Vico.

Dunque, il merito di Cabrera è più che altro quello di aver esteso anche al cinema l'intuizione vichiana degli «universali fantastici», originariamente riferiti alla letteratura.

6. *La vita è meravigliosa*

Per chiarire meglio in che modo i concettimmagine del cinema possano esprimere idee filosofiche, si può prendere in considerazione il bellissimo film del regista americano Frank Capra, *La vita è meravigliosa* (*It's a Wonderful Life*, 1946), puntualmente trasmesso ogni anno in televisione durante le festività natalizie,

Questo film si basa su un'invenzione fantastica che può ricondursi alle teorie di Leibniz. Benché il capolavoro di Frank Capra sia pure analizzato da Julio Cabrera, stranamente Cabrera non mette in relazione *It's a Wonderful Life* con le teorie di Leibniz, ma, per contrasto, con la filosofia pessimistica di Schopenhauer.

Il protagonista di *La vita è meravigliosa* è George Bailey (James Stewart), che fin da ragazzo mostra grande generosità e altruismo. Alla morte di suo padre, George abbandona tutti i suoi progetti e rinuncia agli studi universitari, pur di mandare avanti la Società di costruzioni che il padre ha fondato, allo scopo di offrire case a buon mercato a piccoli borghesi e artigiani. George supera anche l'ostilità del vecchio milionario Henry Potter, finanziere avido e senza cuore. Però la vigilia di Natale, Billy, il vecchio zio di George, smarrisce ottomila dollari della Società, ed espone quest'ultima al rischio del fallimento. Allora George, preso dalla disperazione, afferma che preferirebbe non essere mai nato e vorrebbe uccidersi. Ma Dio gli fa incontrare un aspirante angelo, Clarence Odbody, che deve compiere una buona azione importante per meritarsi le ali.

Clarence salva dal suicidio George Bailey, mostrandogli come sarebbe stata la vita nella sua cittadina di Bedford Falls senza di lui, e quali sarebbero state le conseguenze per le persone che ama se egli non fosse mai nato. La comunità senza George Bailey, e senza il suo contributo, si sarebbe trasformata in un inferno. Questa consapevolezza fa tornare a George la voglia di vivere. George comprende il valore della sua esistenza e, una volta a casa, scopre che i suoi amici hanno raccolto fra loro la somma mancante e salvato la Società di costruzioni.

7. Leibniz e la teoria dei mondi possibili

Nel film di Capra, l'aspirante angelo Clarence chiede a Dio di rivelare a George un 'mondo possibile' che non si è mai realizzato, e in cui George non esiste, ossia un universo alternativo che risiede nella mente divina. Ebbene, i *mondi possibili* sono appunto uno dei temi filosofici più suggestivi affrontati da Leibniz, e di cui le sequenze del film di Capra rappresentano, appunto, i concettimmagine.

In una sua opera del 1710, i *Saggi di Teodicea*[11], Leibniz chiarisce che i mondi possibili sono universi che non si trovano nello spazio e nel tempo, ma che 'abitano' (cioè *sussistono*) nella mente di Dio. Dunque non sono mondi esistenti, ma mondi

soltanto pensati da Dio, e che risultano in sé non-contraddittori. Il mondo creato è solo uno degli infiniti mondi possibili che Dio avrebbe potuto ugualmente creare e in ciascuno dei quali i fenomeni della natura e gli eventi della storia sono diversi rispetto a quelli degli altri mondi.

Secondo Leibniz, nei vari mondi possibili possono trovarsi individui *simili*. Nel nostro mondo, per esempio, esiste un uomo, di nome Giulio Cesare, che attraversa il Rubicone e diventa dittatore dei Romani, mentre in un altro mondo possibile è presente un Giulio Cesare simile al nostro che però *non* attraversa il Rubicone. Questo Giulio Cesare di un altro mondo possibile simile al nostro Cesare (ma non identico ad esso), è detto, nell'odierna terminologia logica, la *controparte* (o controfigura) del Cesare reale. In altri mondi possibili, invece, Giulio Cesare addirittura non esiste.

Leibniz riprende la teoria dei mondi possibili dai Padri della Chiesa che, prima ancora dei pensatori scolastici medievali, paragonano Dio a un saggio architetto che, per creare il mondo, esamina una serie di modelli ideali dei possibili universi tra i quali far cadere la propria scelta. A giudizio di Leibniz, Dio poteva portare all'esistenza *solo uno* dei mondi possibili, perché gli universi si escludono l'un l'altro. Ed essendo perfetto e dotato di volontà buona, tra tutte le combinazioni Dio ha scelto il mondo migliore, cioè quello che contiene la massima quantità possibile di bene, e che è, appunto il mondo in cui 'attualmente' viviamo.

L'ottimismo di Leibniz sembra però smentito dall'innegabile realtà del male. Infatti, se il nostro mondo è il «migliore dei mondi possibili», perché in esso vi accadono crimini di ogni genere? Leibniz scrive i *Saggi di Teodicea* per giustificare la scelta divina di questo mondo, malgrado la presenza in esso del male. La tesi di Leibniz è che il male è una componente necessaria del bene complessivo dell'opera divina.

8. Un racconto fantastico leibniziano

Per illustrare meglio questa concezione, Leibniz conclude i *Saggi di Teodicea* con un racconto fantastico molto 'cinematografico', di cui è protagonista Teodoro, gran sacerdote dei romani all'epoca dei re etruschi (VI secolo a.C.)[12]. Il racconto di Leibniz rielabora un celebre dialogo sul fato dell'umanista Lorenzo Valla, dal titolo *De libero arbitrio*. È proprio questo testo leibniziano che presenta curiose analogie con il film di Frank Capra.

Nella narrazione di Leibniz, il gran sacerdote Teodoro si chiede perché Giove abbia permesso a Sesto Tarquinio, figlio del settimo re di Roma, Tarquinio il Superbo (534-510 a.C.), di violentare Lucrezia, matrona romana e moglie di Collatino. Il crimine di Sesto provocò la cacciata dei re etruschi da Roma (509 a.C.) e la fine della monarchia. Teodoro, per avere una risposta alla sua domanda, si reca ad Atene e dorme nel tempio della dea Pallade Atena. In sogno, la dea guida Teodoro nel palazzo dei mondi possibili, che è strutturato a forma di piramide. Ogni piano contiene un appartamento, e ogni appartamento rappresenta un mondo possibile. In ciascun appartamento c'è un libro, con la storia del mondo che Atena e Teodoro stanno visitando. Teodoro, che non si

trova al vertice della piramide ma in un appartamento intermedio, cerca in questo libro la storia di Sesto Tarquinio. Mette il dito sulla riga che gli interessa e vede apparire magicamente (oggi si direbbe in modo 'olografico') ciò che la linea descrive in forma sommaria. In questo mondo, Sesto non violenta Lucrezia, perché un oracolo lo avverte del delitto che egli potrebbe commettere.

Teodoro passa poi in un altro mondo, cioè in un altro appartamento più alto, e vede un'altra vita possibile di Sesto, in cui egli evita, in un modo diverso, il suo destino criminale. Via via che si procede verso la cima, gli appartamenti sono sempre più belli e rappresentano mondi sempre più perfetti. Giunto in vetta, Teodoro cade in estasi di fronte alla perfezione del migliore dei mondi possibili, quello reale. La dea lo soccorre e lo fa ritornare in sé mettendogli una goccia di liquore divino sulla lingua. Atena gli fa capire che il delitto di Sesto Tarquinio giova a grandi cose: rende libera Roma dalla monarchia etrusca, fa nascere la repubblica, dalla quale, poi, deriverà un grande impero. Quel delitto era nulla di fronte alla totalità degli avvenimenti del nostro mondo. Dopo questa visione, Teodoro si risveglia, rende grazie alla dea, e rende giustizia a Giove.

9. In un mondo possibile tutto è connesso

Ritorniamo a *La vita è meravigliosa* di Capra. Anche nel film del 1946, Dio – tramite l'aspirante angelo Clarence – fa vedere al protagonista un mondo possibile (nel senso stabilito da Leibniz) in cui egli non è mai nato, e gli mostra che tale mondo sarebbe stato peggiore del suo.

Leibniziana è poi l'idea, presente nella stessa pellicola, che gli aspetti negativi del mondo in cui viviamo siano necessari per l'esistenza di quelli positivi, per cui il male esiste solo nella parzialità delle cose e degli eventi, ma svanisce nella considerazione del tutto, che appare invece come mirabile armonia. Nella vita di George Bailey esistono anche momenti di grande disperazione che però, una volta superati, fanno apprezzare maggiormente il bene.

«Musicisti egregi – scrive Leibniz – spessissimo mescolano dissonanze agli accordi, per eccitare e quasi pungere l'ascoltatore, e, dopo averlo reso ansioso di ciò che sta per succedere, rallegrarlo riportando tutto all'armonia»[13].

Anche il pubblico di *It's a Wonderful Life* subisce una sorte analoga a quella dell'ascoltatore di musica descritto da Leibniz: chi vede il film di Capra passa dall'ansia per la sorte di George Bailey alla gioia per il lieto fine, con una commozione che stringe alla gola. Gli spettatori non svengono come Teodoro alla vista del migliore dei mondi possibili, ma ricevono comunque una forte scossa emotiva, messi di fronte alla rappresentazione di una vita veramente «meravigliosa».

Ma nella pellicola interpretata da James Stewart troviamo anche un altro tema caratteristico della filosofia di Leibniz: l'idea che *tutto è connesso*. Infatti, l'incredibile esperienza vissuta da George Bailey dimostra come sia intricato il rapporto che lega e condiziona la vita di ogni uomo a quella di tutti gli altri. Nella dimensione parallela, in cui George Bailey non esiste, suo fratello Harry è morto a quattordici anni per un

incidente sul ghiaccio. Infatti, al momento dell'incidente, non c'era George a salvarlo, com'è invece accaduto nella vita reale. Ma allora sono morte anche tutte le altre persone che il fratello, da militare, ha salvato durante la Seconda Guerra Mondiale.

Ammettere una variazione (che non si è verificata) nel comportamento di un individuo, o addirittura supporre che egli non sia mai esistito, ci costringe a ipotizzare mutamenti non solo nell'esistenza di altre persone, ma anche nello stesso *habitat* circostante. Nelle pagine conclusive dei *Saggi di Teodicea*, Leibniz parla di Corinto, riferendosi al mondo possibile nel quale Sesto Tarquinio non ha violentato Lucrezia, come di «una città situata tra due mari, *simile* a Corinto», ma non *identica* alla Corinto del nostro universo. Analogamente, la Bedford Falls del mondo possibile nel quale George Bailey non esiste, è anche urbanisticamente diversa da quella in cui vive il protagonista del film e ha persino cambiato nome, perché si chiama «Potterville», essendo caduta nelle mani del perfido Signor Potter.

Dunque, all'interno di un mondo possibile, il cambiamento di un singolo fatto provoca la trasformazione di quella che Leibniz chiama una «serie di cose», e, alla fine, di tutto il mondo.

10. *Sliding Doors* di Peter Howitt

Così il filosofo statunitense David Lewis ha spiegato l'idea leibniziana dell'*inseparabilità* che caratterizza gli elementi di un mondo possibile, secondo cui qualunque proprietà di un oggetto si riflette su tutti gli altri:

> Le differenze non vengono mai una alla volta, ma a moltitudini infinite. Prendete, se vi riesce, un mondo diverso dal nostro *solo* per il fatto che Cesare non ha attraversato il Rubicone. Il suo dilemma e le sue ambizioni sono le stesse che nel mondo attuale? E le regolarità del suo carattere? Le leggi psicologiche esemplificate dalla sua decisione? Gli ordini del giorno del suo accampamento? La preparazione delle barche? Il suono dei remi che si tuffano? Tenete invariato *tutto* il resto dopo aver fatto un solo cambiamento, e non avrete affatto un mondo possibile[14].

Anche nel più recente film di Peter Howitt, *Sliding Doors* (1998), si conferma l'intuizione di Leibniz secondo la quale cambiare anche un semplice particolare di un mondo significa – in ultima analisi – cambiarlo *tutto*, a causa del profondo legame che intercorre fra gli eventi.

Il regista Howitt sviluppa le vicende vissute da Helen (Gwyneth Paltrow), la protagonista del film, in due diversi mondi possibili. La divaricazione fra le 'vite parallele' di Helen si pone subito, all'inizio della pellicola: se Helen prenderà la metropolitana, avrà un destino completamente diverso rispetto a quello della sua *controparte*, che invece perderà la coincidenza nella sotterranea. Nel primo mondo possibile, Helen scoprirà che il suo fidanzato Gerry (John Lynch) la tradisce, ma in compenso incontrerà l'affascinante James (John Hannah) nella metropolitana. Nel secondo mondo possibile, invece, verrà scippata appena uscita dal taxi e continuerà la relazione con il fidanzato ignorando il tradimento, almeno per un certo periodo. La semplice variazione di una circostanza

minima come l'apertura o la chiusura delle porte scorrevoli del *métro* (cioè, delle *sliding doors*), può trasformare la sorte di una persona e della realtà che la circonda[15].

11. Modalità e mondi possibili

Circa i mondi possibili, va ricordato che la teoria relativa è stata utilizzata da Leibniz anche per trattare i problemi relativi alla *logica modale*, che ha per oggetto lo studio degli enunciati concernenti *necessità*, *possibilità* e *contingenza*. Questi enunciati sono detti, appunto, «modali» perché si riferiscono ai *modi* in cui le proposizioni possono essere vere (necessariamente vere, contingentemente vere, ecc.). I mondi possibili servono per spiegare il *significato* delle proposizioni modali e, in particolare, servono per stabilire le loro condizioni di *verità*.

A tale riguardo, Leibniz sostiene che le proposizioni *logicamente* necessarie sono quelle che sono vere in tutti i mondi possibili; dunque, un'affermazione come «2 + 2 = 4» è logicamente necessaria perché rimarrebbe vera anche in un mondo completamente diverso dal nostro[16]. A suo giudizio, necessarie sono tutte le cosiddette «verità di ragione» della logica o della matematica circa gli enti astratti. Invece, la proposizione «Cesare attraversò il Rubicone» è contingente (cioè, non necessaria) perché in qualche mondo possibile non è vera. Infatti, nella mente di Dio sussistono dei mondi possibili in cui Cesare (o, per meglio dire, un Cesare simile al nostro) non attraversa il Rubicone. Contingenti sono, secondo Leibniz, tutte le «verità di fatto», quindi anche le verità storiche relative alle azioni degli individui.

In tal modo, Leibniz pensa di superare il necessitarismo di Spinoza, secondo il quale ogni evento del nostro mondo risulterebbe invece logicamente necessario. «E se si volessero respingere assolutamente i puri possibili, – scrive Leibniz – si distruggerebbero la contingenza e la libertà, perché, se non vi fosse nulla di possibile se non ciò che Dio ha effettivamente creato, ciò che Dio crea sarebbe necessario; e volendo creare, Dio avrebbe potuto creare soltanto quell'unica cosa, senza alcuna libertà di scelta»[17].

La teoria modale di Leibniz fondata sui mondi possibili è stata riproposta e sviluppata dal logico e filosofo statunitense Saul Kripke[18].

12. Condizionali controfattuali

Nell'ambito della odierna teoria logica dei mondi possibili, sono emerse anche sottili questioni relative agli enunciati *condizionali controfattuali*, ovvero: contrari-ai-fatti, contrari a come stanno effettivamente le cose. Per esempio, «Se Luigi XVI, nel 1791, fosse riuscito a fuggire dalla Francia, allora la rivoluzione francese avrebbe avuto un esito diverso», oppure «Se George Bush fosse comunista, allora non sarebbe presidente degli Stati Uniti», ecc. I controfattuali, il cui antecedente è sempre falso, formalizzano il periodo ipotetico dell'irrealtà, della forma *Se accadesse A, allora accadrebbe B*.

Una parte significativa della nostra conoscenza è abitualmente espressa da enunciati controfattuali. Ci chiediamo spesso, infatti, che cosa accadrebbe *se* fossero realizzate certe condizioni. E questa conoscenza è valida anche se può darsi che gli eventi possibili di cui parliamo non diventeranno mai attuali. Anche in fisica si concepiscono spesso

stati di cose che non si verificheranno mai. Galileo, per esempio, si immagina cosa accadrebbe a un corpo se non subisse l'influenza di una forza esterna. Gli storici, invece, non hanno molta simpatia per i giudizi controfattuali: è infatti un luogo comune che la storia non si fa con i *se*.

La teoria dei mondi possibili può aiutarci a capire le condizioni di verità di un enunciato controfattuale. Infatti, giudicare vero un enunciato controfattuale come quello citato sopra relativo a George Bush, presuppone un esperimento mentale di questo genere: innanzi tutto si immagina una classe di mondi possibili abbastanza simili al nostro in cui è vero che Bush è comunista, e poi si constata che in tutti questi mondi Bush non è presidente degli Stati Uniti. Una tale analisi dei controfattuali è stata sviluppata dal logico americano David Lewis nel suo libro *Counterfactuals* (*Controfattuali*, 1973).

Film come *La vita è meravigliosa* e *Sliding Doors* visualizzano simili esperimenti mentali, cioè formulano ipotesi contrarie ai "fatti" rappresentati nella pellicola, del tipo: «Se George Bailey non fosse mai esistito, Bedford Falls sarebbe diventata un inferno», oppure: «Se Helen avesse preso la metropolitana, avrebbe incontrato l'affascinante James», ecc., e mostrano un universo possibile in cui si realizza l'antecedente (e quindi il conseguente) di questi controfattuali. Nello stesso tempo, i due film provano che l'esistenza e le azioni dei due protagonisti sono *contingenti*, appunto perché ci presentano vicende alternative, realizzate in un *altro* mondo possibile.

13. La natura dei mondi possibili

Ma qual è la natura ('ontologica') dei mondi possibili? In altri termini, che grado di realtà hanno questi mondi? Leibniz, come sappiamo, li considera pensieri nella mente di Dio, che sussistono sin dall'eternità in quello che egli chiama *le pays des possibles*. Nel Novecento, le posizioni filosofiche riguardo alla natura ontologica dei mondi possibili sono molto diversificate. Si va, per esempio, dalla concezione di Rudolf Carnap che considera i mondi possibili come mere costruzioni linguistiche, sino al realismo modale 'estremo' di David Lewis, che li ritiene tanto reali e concreti quanto il mondo attuale: i mondi possibili sarebbero entità come il nostro mondo, composte di 'cose' al pari del nostro stesso universo. Gli abitanti di altri mondi che giudichiamo 'possibili' possono a buon diritto chiamare il loro mondo 'attuale', proprio come gli abitanti di altri tempi possono chiamare 'presente' il loro tempo (che per noi risulta passato o futuro)[19].

Il regista di *La vita è meravigliosa* sembra assumere la posizione di Leibniz, considerando i mondi possibili come pensieri nella mente di Dio. Infatti, dal film si capisce che il mondo 'reale' è uno solo (quello in cui si svolgono le vicende di George Bailey descritte a partire dall'inizio della pellicola), mentre l'universo alternativo mostrato al protagonista risiede *in mente Dei*, e risulta visualizzabile soltanto grazie a un intervento divino. Invece, Peter Howitt, il regista di *Sliding Doors*, pare propendere per la posizione realista di David Lewis: i mondi possibili sono una sorta di universi paralleli, tant'è vero che il montaggio del film ce li mostra appunto 'in parallelo', cioè

alternando gli eventi che si svolgono in un mondo a quelli che si svolgono in un altro, cosicché tutt'e due le vicende relative ad Helen vengono accreditate del medesimo grado di realtà[20].

C'è una differenza tra la concezione dei mondi possibili di Lewis e quella espressa nel film di Howitt. Mentre per Lewis gli universi sono isolati tra loro, cioè non hanno relazioni reciproche di tipo spazio-temporale o causale (non sono *compossibili*), nell'epilogo di *Sliding Doors* le due storie parallele della protagonista confluiscono in modo misterioso l'una nell'altra, *violando il principio logico di non-contraddizione*.

Saul Kripke ha notato che non esiste alcun telescopio così potente da farci vedere un altro mondo possibile, così come non esiste alcuna navicella spaziale che sia in grado di portarci in un mondo di questo genere: i mondi possibili non sono simili a «distanti pianeti»[21]. Tuttavia, i logici hanno sottovalutato le potenzialità del cinema. Infatti, grazie a film come *Sliding Doors* e *La vita è meravigliosa*, i mondi possibili... li possiamo comodamente *visitare*, restando seduti nella nostra poltrona.

Note

[1] Deleuze si rifà alle considerazioni sul cinema espresse da Henri Bergson nelle sue lezioni al Collège de France sulla storia dell'idea di tempo (1902-1903), e nelle opere *L'evoluzione creatrice* (1907) e *Il pensiero e il movente* (1934). Significativo per l'estetica cinematografica è anche il saggio di Walter Benjamin *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica* (1936).

[2] Su questo punto, cfr. anche [17].

[3] [1] 1451b, 9-10.

[4] [10] p. 174.

[5] Il regista Sergej Michajlovic Ejzenstejn, massimo esponente russo dell'espressionismo cinematografico, interpretava il montaggio come "creazione di pensiero" e lo definiva come «un'idea che nasce dallo scontro di inquadrature indipendenti o addirittura opposte l'una all'altra». In altri termini, per Ejzenstejn la composizione delle sequenze nel montaggio è finalizzata non tanto alla narrazione pura e semplice, ma a coinvolgere lo spettatore in un vero e proprio processo creativo di pensiero. Per esempio, nel film *Ottobre - I dieci giorni che sconvolsero il mondo* (*Oktjabr'*, 1928), dedicato alla Rivoluzione russa del 1917, l'immagine di Kerenskij (Vladimir Popov) viene associata a una serie di inquadrature che rappresentano un pavone che fa la ruota, un busto di Napoleone, una fila di bicchieri di cristallo e una schiera di soldatini di stagno. In tal modo, il montaggio (definito in questo caso "intellettuale") suggerisce agli spettatori l'idea delle ambizioni di potere di Kerenskij, ma anche quella della fragilità della sua posizione politica e dell'inconsistenza della sua forza militare.

[6] Naturalmente, quello che conta è dimostrare la pertinenza dell'interpretazione con argomentazioni convincenti.

[7] [2] p. 15. A giudizio di Cabrera, le immagini cinematografiche «non distraggono ma rendono coscienti; non sviano l'attenzione ma, al contrario, ci fanno sprofondare in una realtà dolente e problematica, come nemmeno la parola scritta a volte riuscirebbe a farlo» ([2] p. 29). In effetti, un film può far 'sentire' agli spettatori un problema filosofico sulla loro pelle, attraverso l'identificazione con i protagonisti della pellicola.

[8] Vico attribuisce la creazione degli «universali fantastici» a un'umanità ancora fanciulla: «I primi uomini, come fanciulli del genere umano, non essendo capaci di formar i generi intelligibili delle cose, ebbero naturale necessità di fingersi i caratteri poetici, che sono generi o universali fantastici, da ridurvi come a certi modelli, o pure ritratti ideali, tutte le spezie particolari a ciascun suo genere somiglianti» ([18], § 209, p. 112).

[9] [2] pp. 16-17.

[10] [2] p. 15.

[11] [11] pp. 373-770.

[12] *Ivi*, pp. 722-731.

[13] [11] vol. I, p. 223.

[14] [13], p. 235.

[15] Il tema dei mondi possibili è stato abbondantemente saccheggiato dal cinema, ma anche dai *comics*. Per esempio, un riferimento ai mondi possibili è presente in una bella storia a fumetti di Topolino, scritta e disegnata dal più grande autore Disney italiano, Romano Scarpa. Si tratta di *Topolino e le dolcezze di Natale* (*Mickey et les douceurs de Noël*) apparsa sul numero 2426 del 16 dicembre 1998 di *Le Journal de Mickey*, un settimanale francese, e ripubblicata poi sul nostro *Topolino* n. 2405 del 1/1/2002. L'episodio è una divertente parodia disneyana del film di Frank Capra *La vita è meravigliosa*, nella quale Babbo Natale mostra a Topolino un altro mondo possibile in cui egli non esiste, e gli fa vedere come sarebbe stata la città di Topolinia senza di lui. Se Mickey non vi avesse mai abitato, Topolinia si chiamerebbe *Gambaburgo* e il fuorilegge *Gambadilegno* sarebbe sindaco. Inoltre, senza *Topolino* come amico, *Pippo* sarebbe diventato un povero senzatetto, *Orazio* avrebbe commesso tanti sbagli sul lavoro da finire in prigione, i nipotini *Tip e Tap* vivrebbero all'orfanotrofio, e Minni sarebbe diventata un'acida zitella.

[16] Una simile tesi è espressa chiaramente da Leibniz nel saggio *Sulla natura della verità, della contingenza e dell'indifferenza e sulla libertà e predeterminazione* (1685-86), laddove egli afferma che le cosiddette «verità eterne» (cioè le verità necessarie): «Non soltanto saranno vere finché ci sarà il mondo, ma sarebbero state tali anche se Dio avesse creato il mondo in un modo totalmente diverso» (in [12] p. 72).

[17] [9] II, p. 95.

[18] Kripke ha reso più fine e articolata la teoria leibniziana dei mondi possibili introducendo il concetto chiave di *relazione di accessibilità* tra mondi. Egli, inoltre, rifiuta la teoria delle controparti, e, a differenza di Leibniz, ritiene che i nomi propri (come 'Adamo', 'Cesare', ecc.) siano *designatori rigidi*, cioè designino lo stesso individuo in tutti i mondi possibili. Se diciamo che Giulio Cesare avrebbe potuto non attraversare il Rubicone, per Kripke intendiamo parlare proprio di *quell'*individuo – Giulio Cesare – in un *altro* mondo possibile, e non di una controparte del 'nostro' Cesare.

[19] «Io sottolineo – scrive Lewis – che non identifico in alcun modo i mondi possibili con rispettabili entità linguistiche. Io li assumo come rispettabili entità a pieno diritto. Quando professo un atteggiamento realistico intorno ai mondi possibili intendo essere preso alla lettera (...). Se qualcuno mi chiede cosa sono (...) posso solo invitarlo ad ammettere che egli sa qual sorta di cosa sia il nostro mondo attuale e quindi spiegargli che gli altri mondi sono molte più cose di questo tipo, che non differiscono quanto al genere ma quanto alle cose che vi succedono. Il nostro mondo è solo un mondo tra gli altri (...). Voi credete già nel nostro mondo attuale. lo vi chiedo solo di credere in più cose di questo genere» [13] pp. 85-87.

[20] Su questo punto, cfr. le penetranti osservazioni di U. Curi in [3] pp. 151-152.

[21] [8] p. 15.

Bibliografia

[1] Aristotele, *Dell'arte poetica*, Fondazione Lorenzo Valla, Arnoldo Mondadori editore, Milano 1974.
[2] Cabrera J., *Da Aristotele a Spielberg. Capire la filosofia attraverso i film* (1999), Bruno Mondadori, Milano 2000.
[3] Curi U., *Lo schermo del pensiero. Cinema e filosofia*, , Raffaello Cortina, Milano 2000.
[4] Curi U., *Ombre delle idee*, Pendragon, Bologna 2002.
[5] Curi U., *Un filosofo al cinema*, Bompiani, Milano 2006.
[6] Deleuze G., *Cinema 1. L'immagine-movimento* (1983), Ubulibri, Milano 1989.
[7] Deleuze G., *Cinema 2. L'immagine-tempo* (1985), Ubulibri, Milano 1989.
[8] Kripke S., *Nome e necessità* (1972), Bollati Boringhieri, Torino 1980.
[9] Leibniz G. W., *Die philosophische Schriften*, a cura di C. I. Gerhardt, 7 voll., 1875-1890, Berlino.
[10] Leibniz G. W., *Scritti di logica*, Zanichelli, Bologna 1968.
[11] Leibniz G. W., *Scritti filosofici*, II voll., UTET, Torino 1967.
[12] Leibniz G. W., *Scritti sulla libertà e sulla contingenza*, a cura di A. Sani, Clinamen, Firenze 2003.
[13] Lewis D., Controfattuali e possibilità comparativa, in *Leggi di natura, modalità, ipotesi*, a cura di C. Pizzi, Feltrinelli, Milano 1978.
[14] Lewis D., *Counterfactuals*, Blackwell, Oxford 1973.
[15] Platone, *Repubblica*, Laterza, Bari 1997.
[16] Putnam H., *Ragione, verità e storia* (1981), Arnoldo Mondadori, Milano 1989.
[17] Sani A., *Il cinema tra storia e filosofia*, Le Lettere, Firenze 2002.
[18] Vico G. *La Scienza nuova* (1744), 2 voll., Laterza, Roma-Bari, 1974.

La scienza, come raccontarla?

Anna Parisi

Casa Editrice Lapis, Roma

Sommario

Per proporre una collana editoriale di divulgazione scientifica per ragazzi dagli 11 anni, abbiamo creato un piccolo gruppo di persone con diverse professionalità: ricercatori, divulgatori e illustratori. Questo lavoro di *équipe* ha portato a superare le difficoltà della divulgazione che, in genere, o è troppo superficiale o è troppo difficile.

Seguendo uno sviluppo storico delle idee, abbiamo proposto ai ragazzi di ripercorrere il cammino compiuto dall'umanità, cambiando e arricchendo le proprie convinzioni, i metodi di indagine e le basi filosofiche della conoscenza, così come è realmente avvenuto nella storia.

I risultati delle vendite (ovviamente considerando il fatto che si tratta di editoria scientifica per ragazzi, non di *best-seller*) sembrano premiare il lavoro svolto, considerando anche il fatto che la collana è oggi tradotta in nove lingue straniere.

1. La scienza, perché raccontarla?

Prima di decidere *come* raccontare la scienza, forse è importante chiedersi *perché* farlo, e specialmente perché raccontarla a ragazzi così giovani. La prima risposta è immediata: perché ad alcuni di loro piace «starla ad ascoltare».

Questo – forse troppo spesso ce lo dimentichiamo – è il prerequisito essenziale: alcuni ragazzi sono interessati a conoscere la scienza al di là e in modo differente da come viene insegnata loro a scuola. Ovviamente la nostra speranza è quella di riuscire a coinvolgere anche i ragazzi che non provano una naturale curiosità per l'argomento, contribuendo così alla diffusione della cultura scientifica tra i giovani affascinando altri a quello che ha affascinato noi quando avevamo la loro età.

La scelta di proseguire gli studi scientifici è legata solo alla passione. Bravo o meno bravo che sia uno studente, nessuno si avvicina alle facoltà scientifiche per ripiego o, meno che mai, perché spera in un successo economico o di potere. Si intraprendono questi studi solo se in qualche modo la fantasia e la curiosità sono state sollecitate a scoprire la grande ricchezza di idee che vive dietro a delle materie che a scuola troppo spesso sono mostrate come distanti e fredde, oltre che troppo difficili.

La scienza nasce dall'amore per il sapere. Se questo amore non viene trasmesso, rimangono vani tutti gli sforzi della didattica.

2. Cultura scientifica?

Non è possibile separare la scienza da un discorso culturale generale. La scienza occidentale si è sviluppata come parte essenziale della filosofia greca e i modelli di universo hanno sempre rappresentato la base dei sistemi di pensiero antichi. Di fatto, il modello della realtà che abbiamo costruito fino ad oggi rappresenta ancora una parte essenziale del nostro sistema di pensiero, ma questa cosa viene spesso sottovalutata e gli intellettuali del nostro tempo, benché forgiati dalle idee scientifiche attuali (specialmente quelle nate dalle teorie relativistiche e quantistiche), ne disconoscono l'importanza fondante. Tra l'altro, mai come oggi, la nostra vita quotidiana è «intrisa» di tecnologia e, positivo o negativo che questo possa essere considerato, questa tecnologia cambia le nostre abitudini, i tempi delle nostre giornate, i rapporti interpersonali, le nostre interconnessioni con il mondo.

Se la cultura è quello che noi consideriamo il «bagaglio dell'umanità» , quello che i padri insegnano ai figli, oggi, forse, la scienza ne rappresenta la parte più consistente.

3. Lo sviluppo delle idee

La nostra proposta è quella di seguire l'evoluzione delle idee, dei modelli scientifici e degli strumenti di indagine conoscitiva, così come è avvenuto nella storia, presentando il lavoro compiuto come frutto della ricerca degli uomini, ma anche dei loro modi di vedere, del loro carattere e della loro personalità.

La scienza è opera degli uomini, è il loro modo di interpretare la realtà, non è una verità assiomatica e incontestabile. La scienza evolve, cambia, risente degli influssi culturali delle varie epoche (oltre ad influenzarli) e soprattutto la scienza è fatta da persone che hanno saputo osservare, pensare, verificare e discutere.

Questi strumenti conoscitivi sono a disposizione anche dei nostri ragazzi e con questi strumenti (l'osservazione, il ragionamento, la verifica e la discussione), i ragazzi dovranno essere capaci di ripercorrere la strada già battuta da altri, di fare propri gli interrogativi, le risposte e i modelli sviluppati dalla scienza nella storia.

Solo in questo modo sarà chiaro loro come la scienza non sia e non possa essere racchiusa in una serie di concetti calati dall'alto, da imparare più o meno a memoria, ma sia invece un processo continuo di apprendimento, di ricerca, di interpretazione e modellizzazione della realtà.

4. Domande e risposte

Non ci preoccupiamo di rispondere a tutte le domande dei ragazzi, anzi, ci sembra più importante mostrare loro come spesso riuscire a porsi la domanda giusta sia più importante che non trovare la risposta che spesso è destinata a cambiare ed evolvere … mentre la domanda resta. Se riflettiamo un attimo, tutta la scienza si è sviluppata dalla domanda di Talete: «da cosa è costituita la realtà che ci circonda?» e a questa domanda l'uomo non è ancora riuscito a rispondere.

Nessuno di noi ha intrapreso gli studi e la carriere scientifica perché «avevamo capito molte cose», noi tutti l'abbiamo fatto mossi dalla curiosità e dalla voglia di

trovare risposte a domande insolute.

5. Ragionare

Nella scienza non si apprezzano solo i risultati della ricerca in senso stretto. Non è entusiasmante solo il punto di arrivo, ma anche il cammino da percorrere e lo stile con cui viene percorso, profondamente diverso da scienziato a scienziato. Mostrando il modo di ragionare dei grandi della storia, noi invitiamo i ragazzi a trovare il loro stile di ragionamento e ad apprezzarne l'utilizzazione, cioè invitiamo i ragazzi a ragionare con la loro testa.

Ragionare è divertente, altrimenti non esisterebbero i giochi di carte o gli scacchi. Ragionare è divertente di per sé (oltre che piuttosto utile) e quindi pensiamo che sia importante insegnare ai ragazzi ad apprezzare il fatto di saper ragionare e a divertirsi nel farlo.

6. Discutere

Anche discutere è importante: scienza è tutto quello che ammette una discussione. Questo lo sanno i ricercatori, ma al contrario, a scuola la scienza viene insegnata come indiscutibile verità. Non si può certo discutere il teorema di Pitagora o la seconda legge di Newton, eppure, se nessuno li avesse discussi, non esisterebbero oggi le geometrie non euclidee o le teorie della relatività.

L'approccio che noi usiamo, cioè quello di mostrare l'evoluzione delle idee, si basa proprio sulla discussione e sulla «messa in discussione» delle idee precedenti, aiutando così i ragazzi a costruirsi questo tipo di mentalità.

7. Metodo espositivo

Come prima cosa, è opportuno togliere dalla mente dei ragazzi l'idea che le cose serie ed importanti siano anche noiose. Nella mente dei giovani, il «prototipo» di scienziato è un tipo studiosissimo, con gli occhiali, che non gioca e che non ride – … certo non rappresenta esattamente quello che loro vorrebbero diventare da grandi.

Nessuno di noi può negare che nella storia siano esistiti scienziati che corrispondano a questa descrizione, ma non erano e non sono tutti così! È importante dipingere i loro caratteri esaltandone i lati migliori, più comunicativi ed allegri, lì dove è possibile farlo.

Specialmente, però, è essenziale parlare di cose serie in modo divertente: ridere è una capacità che gli animali non hanno, solo l'uomo possiede, riconosciamogli quindi, tutto il suo valore, anche da un punto di vista didattico. È molto difficile, infatti, dimenticare qualche cosa sulla quale abbiamo riso, estremamente facile, invece, dimenticare quello che ci ha fatto annoiare.

8. Le interviste

Le spiegazioni dei concetti possono essere spesso lunghe e un po' «pesanti», per ovviare a questo inconveniente, molti approfondimenti teorici sono raccontati sotto forma di intervista che un ragazzo fa ai vari scienziati che hanno contribuito a sviluppare la storia

del nostro pensiero. Le risposte degli scienziati sono tutte tratte dai loro testi originali. La forma discorsiva e leggera che ne risulta, in realtà contiene quindi un grande valore, basandosi sui testi realmente scritti dagli scienziati e quindi mostrando al lettore il vero contenuto delle loro idee.

Tornando alle fonti è inoltre possibile eliminare i molti errori, soprattutto storici, che si tramandano di «divulgazione in divulgazione».

9. Lo staff

Questo collana editoriale di divulgazione scientifica, che si chiama «Ah, saperlo!» è stata ideata da me ed approvata da Giorgio Parisi, docente di Teorie Quantistiche presso l'Università *La Sapienza* di Roma, che ne è il direttore scientifico per quanto riguarda i volumi dedicati alla fisica.

Sebbene anch'io sia un fisico e abbia lo stesso cognome, non solo non siamo parenti, ma Giorgio Parisi non è nemmeno stato mio professore (lo dico perché tutti me lo chiedono).

Negli anni si sono aggiunti nuovi autori su diversi temi di fisica (Alessandro Tonello, Ettore Perozzi, Lara Albanese) e abbiamo allargato i soggetti anche ad altre discipline, quali la biologia (Clara Frontali) e la chimica (Vincenzo Guarnieri).

10. Conclusioni

I volumi fino ad oggi pubblicati hanno avuto un buon successo di pubblico e l'intera collana è stata tradotta in più lingue.

Siamo molto contenti, soprattutto, che sia stata apprezzata dal mondo scientifico e molti ricercatori abbiano espresso il desiderio di collaborare come autori. Pensiamo che la chiave del suo successo risieda nell'allegria e scorrevolezza della forma, abbinata a un attento rigore dei contenuti.

Le persone che hanno collaborato come autori si divertono a studiare, a scrivere i testi e a cercare la forma migliore per parlare ai ragazzi. L'illustratore, Fabio Magnasciutti, arricchisce le pagine con vignette umoristiche di grande acutezza. Pensiamo che il divertimento che noi proviamo nel lavorare, traspaia dalle pagine dei nostri libri e sia quindi percepito e apprezzato dai ragazzi.

Dal web all'i-Pod

Caterina Boccato

Istituto Nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astronomico di Padova

1. Introduzione

L'Istituto Nazionale di Astrofisica, INAF, è stato costituito nel luglio 2000 per promuovere e coordinare l'attività di ricerca in astrofisica attraverso una rete di 19 strutture tra le quali 12 Osservatori Astronomici e 3 Istituti di Ricerca. INAF gestisce inoltre due stazioni osservative: il Telescopio Nazionale *Galileo Galilei* situato a La Palma (Spagna) e il Large Binocular Telescope (LBT) a Mount Graham (Arizona, U.S.A.). Per statuto, INAF ha il preciso compito di promuovere la conoscenza dell'astrofisica nella scuola e nella società.

Nel presente articolo si vuole dare una breve ma, si spera, esauriente panoramica dei nostri progetti per il pubblico, alcuni dei quali realizzati in particolare per le scuole e pensati per le cosiddette «nuove tecnologie».

La maggior parte dei progetti qui descritti sono stati realizzati, a partire dal 1996, dal gruppo di diffusione e didattica dell'Osservatorio Astronomico Padova, gruppo che recentemente – dal 2005 – è confluito nell'Ufficio di Comunicazione e Immagine dell'Istituto.

Questa evoluzione del gruppo ha permesso di valorizzare maggiormente alcuni dei progetti già esistenti e di realizzarne di nuovi. Vi sono quindi progetti pensati per il *world wide web*, tecnologia oggi non più nuova, e altri, più recenti, pensati per essere veicolati, oltre che su web, anche su tv, radio, carta e iPod. In particolare siamo passati dal realizzare solo progetti di *divulgazione* e *diffusione a supporto della didattica* a progetti di *comunicazione e informazione*.

Non sono stati presi qui in considerazione tutti i numerosi lavori realizzati in questi ultimi dieci anni ma, piuttosto, per ciascuno di quelli descritti, si è cercato di metterne in luce la caratteristica principale e di dare soprattutto le «coordinate» giuste per poterli consultare ed eventualmente utilizzare.

Tutti i nostri progetti sono in ogni caso presenti su web e sono visibili ai seguenti due indirizzi:

1. www.inaf.it (Il Sistema Informativo dell'Istituto Nazionale di Astrofisica che ha una pagina PER IL PUBBLICO dalla quale si accede a tutti i siti di interesse per il pubblico e le scuole)
2. www.lestelle.net (Il Portale «Prendi le Stelle nella Rete!»)

2. Perché realizzare progetti di diffusione e didattica dell'Astronomia

Si è brevemente parlato del Chi, Cosa, Dove e Quando. Manca, appunto, il Perché. Si potrebbe «tagliar corto» dicendo che, istituzionalmente, dobbiamo rispondere alle domande che ci vengono poste, quindi *perché la legge lo prevede*. È ovvio che non si può ignorare il pubblico.

In realtà il motivo principale è diverso e molto importante. Per un istituto di ricerca scientifica come il nostro, l'attività di diffusione può essere considerata soprattutto come mezzo e non solo come fine; come mezzo, da almeno due punti di vista, il primo dei quali riguarda proprio l'attività di ricerca: quali metodi, quali linguaggi per comunicare la scienza? Ecco allora che l'informazione che facciamo ci serve per avvicinarci alla gente, e quindi per conoscerla e capirla di più, ed in modo molto più immediato ed emozionale, di quanto facciano la didattica e la divulgazione.

Il secondo è, se vogliamo, scontato: una buona diffusione e informazione scientifica supporta la ricerca anche se questo è in gran parte, anche se non del tutto, compito dei media.

3. Domanda e offerta

La nostra esperienza, espressa in numeri, è riassumibile come segue:

- **30** siti web in www.lestelle.net;
- **1200** domande e risposte ogni anno;
- **3000** classi coinvolte nei nostri progetti di diffusione a supporto della didattica negli ultimi 5 anni;
- **2000** iscritti alla nostra newsletter settimanale;
- **100.000** utenti l'anno e migliaia di visite in occasione di particolari eventi astronomici;
- **900** articoli di Astronomia e Astronautica sul nostro bollettino settimanale audio e video *Urania*;
- **60** radio in tutta Italia che trasmettono il nostro bollettino settimanale *Urania*.

Attenzione, però: questi numeri, come anche tutto ciò che si trova su web, è solo la parte visibile di un lungo processo di ricerca, di interazione dal vivo con il pubblico e con le scuole, di esperienze fatte sul campo – dalle conferenze pubbliche al lavoro diretto, affiancando chi fa la vera didattica e cioè gli insegnanti.

Da questi numeri è emerso un dato oggettivo, che può rispondere alla domanda: «Cosa vuole il pubblico da un Istituto di Astrofisica come il nostro?»

Dopo aver raccolto le migliaia di domande che ci pervengono via e-mail ogni anno o che vengono poste alle conferenze pubbliche o, ancora, che gli studenti fanno durante le attività con le scuole, le abbiamo ridotte, e ricondotte, alle cinque ma esemplari domande riportate qui sotto:

1. Perché la Luna si vede anche di giorno?
2. A cosa serve la ricerca astrofisica?
3. Qual è il ruolo dell'Italia nella ricerca astrofisica?
4. Qual è il ruolo dell'Italia nella ricerca spaziale?
5. Cosa fa un astronomo durante il giorno? (Ammesso che di giorno un astronomo lavori…)

Quindi: sì, l'Astronomia nel senso «classico» del termine (il cielo visibile) ma molta curiosità e voglia di sapere *perché* si fa ricerca astrofisica, *come* la si fa e quale sia il *ruolo* del nostro Paese nel campo astrofisico e spaziale.

Vediamo quindi come abbiamo risposto in questi anni, quali progetti abbiamo sviluppato e quali media abbiamo usato.

4. I progetti di diffusione a supporto della didattica

Dobbiamo partire, perché non possiamo non citarlo, da quello che chiamiamo il «sito storico»: il *Planetario Virtuale*, il primo, in assoluto, sito web interattivo in lingua italiana; il primo esempio, a livello nazionale, dell'uso delle «nuove» tecnologie dell'informazione a supporto della didattica.

Il *Planetario Virtuale* è nato nel 1996 e, anche se «vecchio», è rimasto perfettamente fruibile sia dal punto di vista tecnologico che concettuale e lo si può vedere/leggere/usare all'indirizzo www.oapd.inaf.it/pianetav/.

Questo progetto è stato testato nelle scuole durante la seconda parte dell'anno scolastico 1997/98 e per l'intero anno scolastico 1998/99. Si parla di Astronomia di base, vi sono immagini, animazioni ed esempi per capire al meglio alcuni dei concetti base della Fisica.

Ogni livello richiede la comprensione di quello precedente e la metodologia didattica è il cosiddetto Ciclo di Karplus [1], il quale asserisce che la corretta acquisizione di concetti è strettamente legata alla rimozione dei preconcetti, dei quali per altro abbiamo messo a disposizione una lista proprio nel sito web. Vorrei sottolineare che, nel 1997, l'ipertestualità era vista come uno strumento rivoluzionario pur non essendo nuovo in generale – lo era certamente per le scuole.

Dopo questa prima esperienza abbiamo sempre lavorato per guadagnare e soprattutto mantenere nel tempo la fiducia di studenti e insegnanti. Quindi, da allora abbiamo continuato a lavorare duramente in questo senso, collaborando sempre di più con una rete di insegnanti e scuole disposte a seguire i nostri progetti, a testarli e soprattutto a inviarci il loro preziosissimo *feedback* per poter correggere progetti già in uso e metterne a punto di nuovi.

Dopo il *Planetario Virtuale*, tradotto completamente anche in Inglese, sono seguiti, nel 1999, Il progetto *Cielo!*; nel 2001 abbiamo attivato «Polare.it», il portale di Astronomia per gli insegnanti (www.polare.it); sempre nel 2001 si è svolto «Vita

nell'Universo»; tra il 2004 e il 2005 abbiamo sviluppato il progetto *Learning from starlight* e, dal 2002 al 2007, all'inizio di ogni anno scolastico è partito il progetto *Alla scoperta del Cielo* giunto alla sua quinta edizione!

Cielo! (raggiungibile o da www.polare.it o direttamente su www.oapd.inaf.it/othersites/polare/cielo.html) è un vero e proprio corso di Astronomia e Fisica composto da 7 moduli molto corposi, con teoria e pratica, schede di valutazione e preparazione delle lezioni e delle esperienze da svolgere in classe. Può essere seguito da classi di alunni dai 6 ai 13 anni, ogni modulo essendo ovviamente indirizzato ad un preciso anno scolastico.

Dopo *Cielo!* abbiamo pensato di pubblicare un sito web dedicato esclusivamente agli insegnanti: «Polare.it», dove potrete trovare tutti i progetti INAF di diffusione a supporto della didattica e anche una certa quantità di contributi mandati dagli insegnanti stessi; c'è inoltre una lista *mail* alla quale ci si può iscrivere e una corposa sezione sul «Astronomia e Handicap» con diverse esperienze svolte nelle classi con alunni, appunto, portatori di handicap.

Vita nell'Universo (www.oapd.inaf.it/othersites/altrimondi/) è invece un progetto che si è distinto per il diverso approccio usato rispetto ai progetti precedenti e cioè il richiamo diretto agli studenti: proprio i più giovani, si sa, risultano essere i fruitori più assidui del web e quindi, attraendoli con un sito dinamico e un argomento affascinante e intrigante come la possibilità dell'esistenza di altre forme di vita nell'Universo, siamo riusciti ad avere un numero enorme di classi iscritte al progetto.

Ma forse il progetto di diffusione a supporto della didattica di maggior successo è *Alla Scoperta del Cielo!* (www.scopriticielo.it). È realizzando e portando avanti tale progetto, nelle diverse edizioni annuali, che ci siamo chiesti cosa significhi fare un progetto veramente *multimediale*. La prima edizione fu lanciata nel settembre 2002 per l'anno scolastico appunto 2002-2003: benché gli utenti avessero un solo mese di tempo per iscriversi, e unicamente on line, il numero di iscritti è stato enorme (900 classi in tutta Italia!) tanto che abbiamo continuato a ripeterlo nelle edizioni successive apportando vari miglioramenti ai contenuti. Si trattava inizialmente di una spedizione, via e-mail, agli iscritti di contenuti in pdf ben curati anche dal punto di vista grafico, contenuti che poi essi ritrovavano anche nel sito web del progetto arricchiti di immagini. Una volta alla settimana gli studenti e i loro insegnanti ricevono i contributi realizzati in 4 versioni a seconda di 4 precise fasce di età, cioè, 6-8, 9-10, 11-12, 13-14; inoltre, ogni anno viene anche abbinato al progetto un concorso.

Alla fine della terza edizione le numerosissime richieste degli insegnanti ci hanno indotto a convertire tali contributi, comprese le guide per gli insegnanti, in formato di libri veri e propri, prodotti dalla casa editrice EDITORIALE SCIENZA di Trieste, e alla quarta edizione abbiamo venduto – ovviamente a prezzo di costo – 7.000 libretti! Dal web alle e-mail e infine alla carta quindi!

L'ultimo progetto, di cui ci sarebbe molto da dire, ma che qui accenneremo soltanto rimandando al sito Web ad esso dedicato, è *Learning from Starlight – Progettare per*

Comprendere (www.oapd.inaf.it/hp/). È nato da una donazione che la Hewlett Packard ci ha concesso, consistente di 26 *tablet pc* e 26 *pocket pc wireless* coi quali abbiamo realizzato un progetto durato più di 1 anno di *mobile-learning*.

5. I progetti di diffusione e informazione

Vale la pena citare in questo contesto un progetto realizzato nel 2000: *A riveder le stelle*, il primo sito di Astronomia dedicato ai non vedenti (www.pd.astro.it/ariveder/). Anche in questo caso dal sito è nato un libro in Braille, con immagini astronomiche professionali elaborate da un apposito software sviluppato negli Stati Uniti.

In occasioni di eventi astronomici particolari, come eclissi di Sole o Luna o, per esempio, il passaggio di Mercurio davanti al Sole, l'INAF cerca sempre di coprire la richiesta del pubblico e, per questo, si fa ricorso anche a tutta l'esperienza pregressa degli osservatori astronomici che costituiscono l'Istituto. Per farsi una idea delle iniziative in questo senso, invito il lettore a visitare il sito www.inaf.it e, in particolare la pagina per il pubblico.

Negli ultimi anni l'Ufficio Comunicazione ha voluto sperimentare l'informazione. Ci siamo ritagliati questa nicchia partendo dall'esperienza del nostro gruppo di Padova che già nel 2000 aveva realizzato Urania, un tipo di informazione in pillole, più diretta ed immediata rispetto alle attività di diffusione e didattica. Poi nel 2005 siamo partiti con *I Corti dell'INAF* che propongono un'informazione attraverso filmati brevi, che ci permettono di arrivare al cuore della gente, di suscitare emozioni e quindi sempre nuove domande da parte del pubblico.

Urania (www.cieloblu.it) nasce nel 2000 come bollettino settimanale in Real, accessibile quindi solo da web. Si è evoluto nel tempo: ha assunto più formati, dall'html al Flash, ed è veicolato su media diversi, dai lettori Mp3 alle radio. È un tipico esempio di ricerca costante del linguaggio migliore, scritto e parlato, per arrivare a più persone, al grande pubblico, in particolare ai giovani. Urania è in grado di rispondere in modo semplice alle domande: cosa vuol dire fare Astrofisica oggi? Quali vantaggi può portare alla società? Dà *voce ai protagonisti* della ricerca scientifica italiana e internazionale attraverso interviste ai nostri ricercatori.

I Corti dell'INAF (www.inaf.it, in Home Page) è nato nel 2005 insieme all'Ufficio Comunicazione e Immagine ed è rivolto a un pubblico generico di non astrofisici (non addetti ai lavori) e consiste in una ventina di video di «scienza in pillole» che seguono due linee editoriali diverse: quella del servizio giornalistico scientifico televisivo d'attualità (in cui non si vuole inventare nulla e anzi si spera di arrivare, nel nostro piccolo, ad assomigliare a quanto esiste già) che generalmente fa parte di un *press package*; e quella del «redazionale» (tipicamente filmati per eventi) dove si ha maggiore libertà, sia per i vincoli temporali meno stretti che per i vincoli di formato, e possiamo cercare di veicolare l'informazione attraverso persone ed emozioni. Passano così in secondo piano la completezza d'informazione, l'accuratezza, l'unitarietà, la linearità del discorso e l'intento didascalico; diventano invece più importanti il ritmo, l'empatia, la capacità

comunicativa e, non ultima, l'estetica.

6. Conclusioni

Da quanto detto appare chiaro che un istituto di ricerca come il nostro sta sperimentando e continuerà a sperimentare i nuovi e meno nuovi media per fare diffusione dell'astrofisica e veicolare l'informazione legata a questa scienza; e questo, come dicevo all'inizio, non è il fine ma il mezzo per capire sempre meglio il nostro pubblico, conoscere noi stessi e ricercare i metodi e linguaggi migliori per veicolare i nostri messaggi.

Note

Caterina Boccato, attualmente riveste funzione tecnico-scientifica presso l'Istituto Nazionale di Astrofisica di Padova. Specificatamente si occupa di progetti di comunicazione, diffusione e didattica dell'Astronomia per l'Ufficio Comunicazione e Immagine dell'Ente. Laureata in Astronomia nel 1996.

BIBLIOGRAFIA

[1] Karplus R., et al., AESOP Publication ID-32, Berkeley 1976.

Divulgare la scienza: leggere e saper fare*

Helene Stavro

Casa Editrice Editoriale Scienza, Trieste

Premessa

Penso di parlare a bibliotecari e a maestri (quindi con una formazione più letteraria che scientifica)… Com'è il vostro rapporto con la scienza? Prima di passare a esaminare l'offerta dei libri di «divulgazione scientifica», mi soffermo su alcune riflessioni su lettura e scienza, che possono contribuire a contestualizzare i libri e i percorsi che dopo vedremo più in dettaglio.

1. In Italia si legge poco...

A settembre si sono tenuti a Roma gli 'Stati Generali' dell'editoria. Il tema proposto per la discussione è stato: INVESTIRE PER CRESCERE, cioè si è cercato di verificare, dati alla mano, se c'è un rapporto tra i libri e lo sviluppo economico di un paese. Quante volte abbiamo letto sui giornali o sentito al TG che l'Italia investe poco in cultura e ricerca?

La ricerca è stata svolta da due economisti delle Università di Bologna e Trento. Riassumo i risultati:

1. LIBRI E PIL. Hanno dimostrato che la diffusione della lettura fa aumentare la produttività del lavoro, il PIL. Ne consegue che un paese dove si legge è un paese competitivo e quindi investire in programmi di promozione alla lettura ha un effetto sull'economia maggiore degli incentivi agli investimenti in capitale. Riassumendo: una biblioteca è più utile allo sviluppo economico di una tangenziale. Si tratta di un'utilità di lungo periodo.

2. LIBRI E RISULTATI SCOLASTICI. Ecco cosa ci dice un'analisi sui risultati scolastici in relazione alla dimensione della biblioteca familiare e dell'atteggiamento verso la lettura – focus di Pisa (*Programme for International Student Assessment*) del 2000 sulla capacità di lettura, scrittura e comprensione dei testi e sul rapporto studente/libro – : al crescere della biblioteca familiare si registra un significativo aumento dei risultati scolastici. In Italia i ragazzi che hanno a casa una biblioteca di 100 libri ottengono risultati del 17% migliori dei ragazzi che non hanno questa fortuna. Un'elevata disponibilità di libri è indice di una maggior disponibilità monetaria, ma soprattutto di un ambiente favorevole alla cultura e all'accumulazione della conoscenza. Una biblioteca a casa è in stretta relazione al piacere della lettura, quindi a una crescente disponibilità familiare

di libri si accompagna un favorevole atteggiamento verso la lettura e quindi un miglioramento delle capacità scolastiche.

2. E la scienza?

Nel complesso, il momento attuale è senz'altro favorevole alla percezione della scienza da parte del grande pubblico e dei media: basti pensare a manifestazioni come il Festival della scienza di Genova, o quelli più piccoli di Perugia, Bologna e così via, al maggiore spazio in TV, alle nuove riviste anche per ragazzi (*Focus junior, Esplora, Scoprire*).

Da quando abbiamo iniziato, quasi 15 anni fa, a oggi è senz'altro cresciuta la consapevolezza dell'importanza, nel bene e nel male, della scienza nella vita di tutti e nel nostro futuro; ed è cresciuta la conseguente convinzione che è necessario acquisire un'informazione che permetta a me, come cittadino, di giudicare con cognizione di causa i vantaggi che il progresso della scienza può portare e i rischi che comporta e di consentire ai propri figli, grazie all'educazione, la capacità di incidere e migliorare e progredire e crescere... C'è quindi un ambiente più favorevole ed è quasi un dovere per noi cogliere questa favorevole congiuntura e farci carico anche dell'onere di essere editori di scienza, cosa che, vedremo, non è facilissima.

3. Entriamo nell'editoria

La produzione, i lettori, scienza per ragazzi ... Ecco la torta tratta dalla statistica dell'ISTAT.

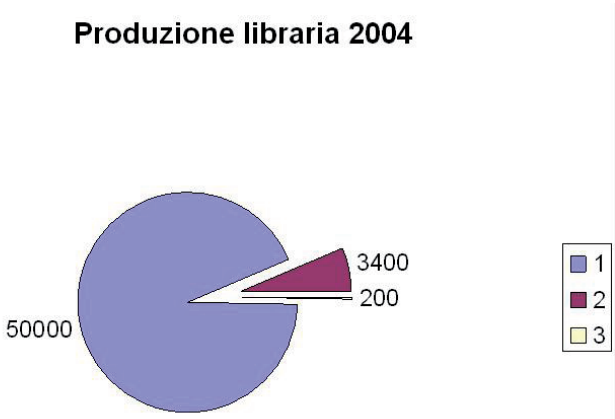


Figura 1 - Grafico tratto dall'indagine ISTAT sulla produzione libraria in Italia. La torta rappresenta la produzione libraria In Italia dei libri cosiddetti di «varia», che non comprendono la scolastica. La fettina più piccola (2) sono i libri per ragazzi e la striscia sottile (3) i libri di divulgazione scientifica.

Ogni anno l'ISTAT analizza la produzione. Come potete vedere, i libri per ragazzi rappresentano il 5% della produzione (siamo nella varia, non c'è la scolastica) e i libri di scienza quella magrissima fettina.

Ritorniamo alla nostra produzione e focalizziamo l'attenzione sulla statistica

precisa e attenta pubblicata da Liber, la rivista specializzata della Biblioteca di Campi Bisenzio (http://www.liberweb.it/rivista/rivista.htm): da questa ricaviamo che lo scorso anno i libri per ragazzi sono stati 2200 – un dato che recupera la flessione dell'anno precedente.

Ma è ancora più significativo, almeno per noi, che la narrativa è molto incrementata: la divulgazione tutta, cioè anche i libri di attività, giochi, arte, le enciclopedie, sono il 22% del totale, 450 libri, mentre scienza e natura arrivano a 200 libri con un misero 10%.

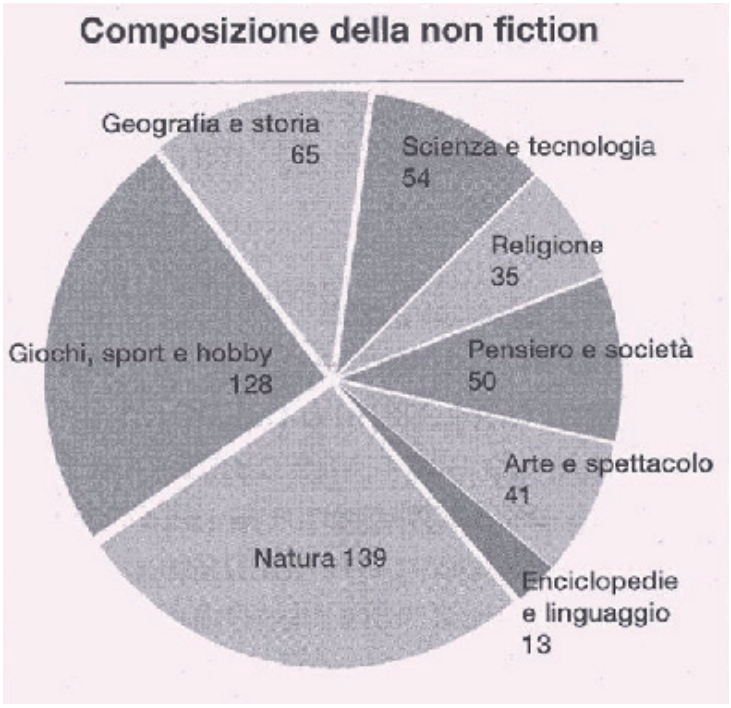


Figura 2 - Grafico tratto da LIBER, Rapporto sull'editoria 2006 e illustra la composizione della non fiction, che comprende anche la divulgazione scientifica (natura e scienza e tecnologia).

Ricapitolando questi numeri e grafici:

- in Italia si pubblicano 55.000 libri all'anno;
- di questi, circa 3400 sono per ragazzi;
- di questi, quasi 200 sono di natura e scienza.

Dunque *poco*: si pubblica poco e forse si legge ancor meno (attenzione, la torta di cui parliamo raccoglie i dati della *produzione*).

4. Come definiamo un libro di divulgazione scientifica?

Non è del tutto chiaro. Di solito si ricorre al termine anglosassone che distingue tra *fiction e non fiction*, o il francese *documentaire.*

È un modo di raccontare la realtà in modo ordinato, ma anche in modo da suscitare curiosità, da far venire voglia di chiudere il libro e andare alla ricerca del mondo vero, oppure di aiutare a immaginare un futuro possibile. È più facile dire quali non sono libri

di divulgazione: i testi scolastici, l'articolo giornalistico, l'enciclopedia (se è utilizzata come consultazione).

5. E chi sono i divulgatori?

Uno scienziato o un comunicatore o un autore o tutti questi? L'autore deve avere il giusto clic per rendere accessibile e attraente quanto vuole raccontare. Spesso è un lavoro d'equipe: il divulgatore scrive e lo scienziato controlla.

In ogni caso l'autore deve avere un'ottima conoscenza della materia, deve saper stimolare, deve nel contempo avere una sua personalità, insomma essere un 'autore'. Secondo Piero Angela, in un buon libro ci deve essere una sfida, nel senso che il libro deve dare qualcosa in più al lettore, quindi non deve essere né troppo banale, né troppo difficile, altrimenti allontana, invece di produrre l'apertura verso nuovi mondi. Quindi un buon autore sa scrivere bene, come in un libro di narrativa, e sa semplificare i codici, che non significa semplificare, banalizzare. È veramente difficile!

6. Gli argomenti

Sono rappresentate tutte le scienze? Quali sono 'in cima' e quali le differenze? Ci sono argomenti più vicini al mondo dei ragazzi, ci sono argomenti che vengono in qualche modo trattati a scuola (le 'ricerche') e argomenti che si sono sempre proposti ai ragazzi. Va comunque sottolineato che da un confronto tra la *top ten* del 1995 e questa, che riporta i dati del 2005, si nota un aggiornamento con la ricerca attuale: computer, energia, comunicazione, cervello.

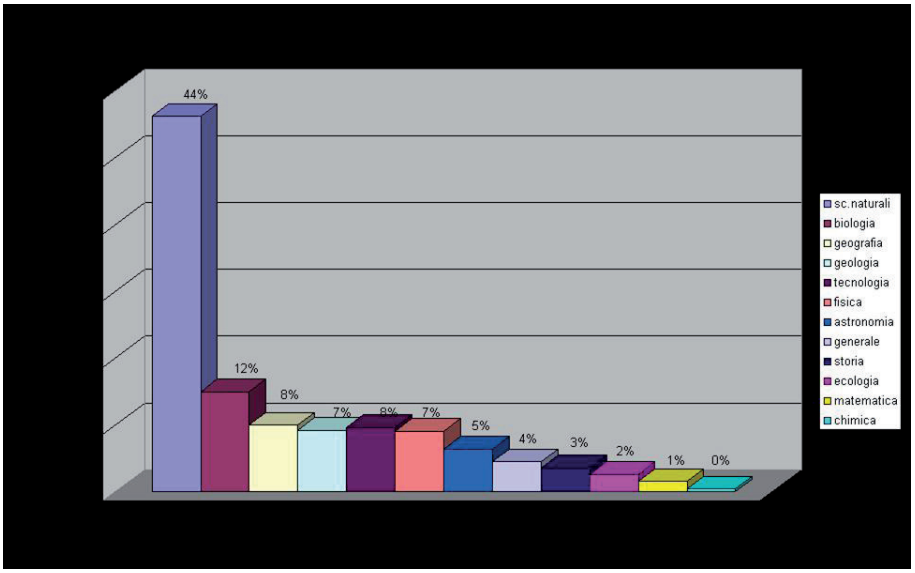


Figura 3 - Grafico che visualizza la quantità dei volumi pubblicati in Italia dal 1993 al 2006 di divulgazione scientifica per argomento.

- Le scienze naturali hanno il 45%: libri sugli animali, sulle piante, sulla natura in genere… Il bambino può osservare, il bambino si interessa agli animali e alla loro vita.

- Segue a gran distanza la biologia, come insieme delle scienze della vita (circa il 15%): libri sul corpo umano, sui cinque sensi, di educazione sessuale, sulla nascita, sull'evoluzione, l'alimentazione e l'igiene, il cervello e l'uso del microscopio.
- Altro 10% di geografia e ecologia, e cioè: libri sugli ambienti terrestri, descrizioni della Terra, ambienti marini e meteorologia.
- Poi tecnologia (9%): soprattutto, mezzi di trasporto, scoperte e invenzioni, computer, 'come funziona', case, tempo, comunicazione, misure, mostrando attenzione all'interesse dei bambini (pomeriggi passati a vedere lavorare le ruspe, il viaggio in treno o in aereo).
- La fisica (in cui abbiamo inserito più per attenzione al metodo anche libri di esperimenti in senso lato) arriva al 7%: libri di esperimenti appunto, sull'energia, sul fuoco e sul calore, sulla luce e il colore, sull'aria e sull'acqua, elettricità, magnetismo, movimento, suono, materia.
- Un buon 6% all'astronomia, dove l'osservazione scientifica del cielo si accosta facilmente al mito, alla storia, al meraviglioso, e ai successi dell'esplorazione dello spazio e quindi anche alla fantascienza. Poi praticamente nulla.

Una riflessione: quando si leggono articoli riguardanti divulgazione sulle riviste specializzate in lettura e ragazzi (mi riferisco a *Liber*, *Sfoglialibro*, *LG Argomenti*, *Andersen*), si parla per lo più delle diverse tipologie (e ne parleremo anche noi) e molto meno degli argomenti che vengono proposti. La *non-fiction* è un unicum… Ma è così? Nella prospettiva di investire in creatività e rinnovamento anche nel campo della *non-fiction*, così come è avvenuto nella *fiction*, va analizzato l'aspetto degli argomenti, per riuscire a proporre una divulgazione che sia adatta ai bambini, ma anche collegata ai grandi temi del dibattito scientifico in corso.

7. Il nostro progetto e la nostra esperienza

Vi parlo ora della nostra esperienza, perché è quella che conosco e perché nella sua specialità è abbastanza rappresentativa dei diversi percorsi possibili. Quali sono le caratteristiche della nostra proposta sia editoriale che di promozione con gli interventi di animazione?

1. Pubblicare e insegnare ad usare *TANTI LIBRI DIVERSI.*
2. Promuovere una lettura di una scienza che sia soprattutto *DA FARE.*
3. Far toccare con mano che la scienza è *INTERESSANTE* e *DIVERTENTE*, che capire è *BELLO*.

Tanti libri, ma quali libri ci sono? Vi leggo qualche titolo (immaginario, ma verosimile…): Il grande libro della natura, I segreti della natura, Natura meravigliosa, I perché della natura, Scopriamo insieme la natura, Il naturalista racconta, Il manuale

del giovane naturalista, Il taccuino del naturalista, Le avventure del giovane naturalista, natura spassosa, la natura a 3D, La tua prima natura. Quale è il libro «buono»?

La lettura di un libro trova la sua «bontà» soprattutto nel contesto, e questo vale ancor più nel libro di scienza che è spesso un libro non solo da leggere, ma un libro in cui ricercare, un libro con cui agire, un libro da condividere, ecc. Ritroviamo quindi diverse «tipologie» ovvero diversi modi di divulgare. Alcuni saranno più adatti in certe occasioni, altri in altre.

Vediamo dove, come e quando si legge di scienza:

- è la lettura, o anche l'attività, che si fa a scuola – e sappiamo che a scuola può essere fatta in tantissime maniere;
- è una lettura in famiglia, per educare, insegnare, scoprire insieme, in quella bellissima attività che è l'essere genitori;
- è anche una lettura personale – il ragazzino appassionato – che si avvicina alla narrativa;
- è una lettura sociale, diffusa, da 'comunicazione di massa', e quest'aspetto si ritrova forse più nella TV, nei video, nelle proposte in edicola (si pensi al successo dei mensili scientifici e di *Focus Junior*) più che nell'editoria libraria;
- è ultimamente una lettura che si fa in rete.

8. I diversi approcci

All'interno dell'elenco di titoli che abbiamo visto ci sono approcci diversi che possono essere utilizzati in diverse occasioni, in diversi contesti, e c'è anche quella che potremmo individuare come un'evoluzione, o almeno una linea di tendenza.

Vediamone un semplice elenco e lo seguiremo con i libri del nostro catalogo, di cui cercherò di illustrare il contenuto e un po' anche la storia:

- Grandi summe: il grande libro del… è un classico regalo per la prima comunione, della zia attenta, non so se più riservato ai maschietti, ma lo sospetto, e molto spesso è stato uno dei primi libri e ha fatto scattare qualcosa… oggi sono particolarmente belli, curata la parte iconografica, forse un po' meno il testo, che a volte è troppo difficile. (*Enciclopedia attiva della scienza*)
- Libri del *perché*, domande e risposte, libri dei *record*: si parte dall'interesse dei ragazzi (a volte presunto, ma l'intenzione è buona), dall'osservazione e dalle domande che il ragazzo fa: *perché ...*, *perché ...*, quindi è un modo per interessare e anche un aiuto ai genitori. Una recente proposta, che forse si inserisce in questa tipologia (ma al confine con il gioco vero e proprio e che riecheggia i successi televisivi), sono i libri di quiz. (*Quiz scintilla*)
- Collane: singoli volumi monografici, che però sono 'collana', legati tra loro per connessione degli argomenti e da un'uguale veste grafica che facilita la

lettura dei diversi volumi, con un essenziale uso dell'immagine presa dalla televisione e diversi livelli di discorso – testo principale, didascalia, inciso. (*Obiettivo ambiente*)

- Libri di storie, libri di scoperte ed esplorazione, biografie (*Lampi di genio* di Luca Novelli e *Donne nella scienza*): sono narrazione, il ragazzo (ma anche noi adulti) vuole immedesimarsi, cerca dei modelli. Da questi testi emerge il concetto che la scienza non è qualcosa di fisso, ma una continua ricerca.
- Racconti scientifici in cui è la scienza stessa che diventa protagonista, una sorta di umanizzazione, un viaggio… Tra i precedenti illustri ci sono Primo Levi o Isaac Asimov. (*Bianca senza macchia*)
- Libri da ridere: per inserire le informazioni scientifiche in un contesto più familiare e facile per i ragazzi. (*Meteore, Scintille, Willy*)
- Libri di esperimenti: da fare a casa, da fare a scuola, per riscoprire la gioia di pasticciare, ma anche perché *facendo si capisce di più*, perché fare è giocare, perché fare è coinvolgente. (*Apprendisti scienziati, Officine, A scuola di scienza*)
- Scienza per piccolissimi: si è di molto abbassata l'età in cui si danno libri ai bambini (che sia anche l'effetto di *Nati per leggere*? O dei nidi ...), albo e testo a filastrocca o primo libro della natura, con cura del disegno come per gli albi raffinati e personaggi guida. (*Lab Gatti*)
- Temi scottanti, argomenti trasversali, attualità. (*Cacca, Se il mondo*)
- Libri da emozione, libri spettacolo (*pop up*, trasparenti, buchi, materiali diversi, libri tattili, occhiali): insegnare, divulgare significa interessare, suscitare curiosità e quindi un uso attento e sapiente delle tecniche che sono disponibili nella tipografia. (*Grande storia universale scienza snack*)

Cosa succede quando si impara a leggere, lavorare, fare scienza usando più libri, con la biblioteca di scienze? (1) Si hanno più informazioni perché si lavora in gruppo, in *équipe* proprio come i veri scienziati, perché magari ognuno legge un «suo testo» e si ha così un'integrazione tra aree diverse e la possibilità di confronto e discussione; (2) c'è più aggiornamento, un maggiore legame alla vera scienza disponendo di dati scientifici aggiornati e confrontabili: si guadagna tempo, si ha un'informazione *up to date*; (3) ci si imbatte in attività di sperimentazione spesso affini, ma magari leggermente diverse che stimolano la sfida a vedere «se riesce»; (4) si leggono testi diversificati, sia a livello di testo sia nelle immagini, (che nella divulgazione hanno una grande importanza, sono testo, *informazione* – si pensi ai video), che consentono diversi livelli di lettura e favoriscono la comprensione; (5) si motiva la ricerca e quindi l'apprendimento: confrontare, prendere appunti, verbalizzare, valutare e citare la fonte.

Sono importanti tutti i diversi approcci. È importante lavorare con una biblioteca

di scienze, con pluralità di proposte: questo modo di lavorare propone una mentalità, un approccio alla cultura fondamentale per i ragazzi che hanno sempre più masse d'informazioni disponibili (esercizio ancor più essenziale, con le informazioni reperibili su Internet), ragion per cui la capacità di muoversi e setacciare le diverse informazioni è essenziale. I ragazzi, quindi, imparano a saper utilizzare la propria testa: il metodo scientifico è indispensabile per ogni forma di conoscenza. Essere curiosi, cercare di capire come stanno le cose, come funzionano, riflettere e osservare, farsi delle domande partendo dalla vita di tutti i giorni, discutere, ricercare ipotesi, trovare gli strumenti per verificarle, provare e riprovare, mettere in dubbio, lavorare su un progetto, lavorare in gruppo, lavorare in modo interdisciplinare, sviluppare le capacità organizzative, saper documentare questo è il metodo scientifico ed è un metodo valido per qualsiasi disciplina, ma che forse è più facile da affinare proprio avvicinandosi alla scienza.

9. La scienza e il fare

Un'altra caratteristica importante da sottolineare come specialità, peculiaretà, direi quasi ricchezza e *plus* che offre il leggere di scienza è il suo legame con il FARE.

Il nostro progetto editoriale è nato collegato al LIS (Immaginario Scientifico), il primo *science centre* italiano, che ha sede a Trieste.

Il primo *science centre* fu fondato nell'immediato dopoguerra a San Francisco da Robert Oppenheimer, il fratello del direttore del progetto Manhattan, cioè di quella eccezionale operazione di studi scientifici che portò i maggiori fisici a lavorare insieme nel deserto dell'Arizona e che portò al controllo della radioattività, ma ahimé a un controllo usato per fabbricare le bombe di Hiroshima e Nagasaki. Il dibattito che ne seguì, e gli interrogativi che l'uso della scienza suscitò, spinse Oppenheimer a creare l'*Exploratorium*, ovvero un museo della scienza di tipo nuovo, che aveva come sui punti portanti: diffusione e comprensibilità della scienza e quindi democratizzazione, l'essere rivolto alle giovani generazioni e alle famiglie, la ricerca di suscitare un atteggiamento attivo, in prima persona, del visitatore; l'intento di stupire, meravigliare, suscitare interesse.

Il progetto dei *science centre* si è diffuso poi nel mondo intero e da un decennio anche qui in Italia sono sorti numerosi *science centre*, che non solo propongono un nuovo tipo di museo rivoluzionando l'aspetto del solo guardare, ma sono diventati dei luoghi di elaborazione di *cosa* e *come* diffondere la scienza.

E Il primo in Italia è stato proprio l'Immaginario Scientifico di Trieste (www.immaginarioscientifico.it). Quindi scienza come azione, fare per capire, fare per responsabilizzarsi, fare per coinvolgersi.

Di qui:

- recupero della manualità;
- recupero della progettualità;
- recupero della creatività;

- recupero dell'invenzione;
- recupero del gioco;
- recupero delle emozioni.

Ecco perché nei nostri libri c'è sempre un grande spazio al fare, ecco perché abbiamo scelto di promuoverli con qualcosa di attivo, con le animazioni scientifiche.

10. La scienza è divertente

Arriviamo così all'ultimo punto che mi preme sottolineare: la scienza è divertente, la scienza è interessante.

Le scienze sono più che mai legate all'insegnamento, e questo vale in parte anche per noi adulti. Le scienze si studiano, ci si lavora.

Come impara il bambino piccolo (che impara a camminare e a parlare ben prima dell'età scolare)? Impara se nessuno lo obbliga, se lo vuole; impara se l'ambiente risponde, se è stimolante (e stimolato) per la sua voglia.

Non s'impara quello che viene insegnato, ma quello che si vuole imparare, perché IO lo ritengo, lo sento, utile e divertente. Quindi noi cerchiamo di aiutarlo in quello che lui vuole, perché è lui il protagonista. Allora posso spiegare un concetto scientifico:

1. Spiego bene, magari anche con begli schemi, ecc.: i bravi ragazzi ascoltano, ripetono… e dimenticano.
2. Faccio vedere degli esperimenti: i bambini mi seguono con interesse, magari m'invidiano.
3. I bambini sperimentano direttamente, progettano, realizzano, discutono, fanno ipotesi, sbagliano: SONO COINVOLTI.

Nella realtà della scuola, queste modalità coesistono a seconda delle occasioni, ma noi, che possiamo permettercelo perché facciamo parte della cosiddetta educazione «informale», proponiamo una lettura attiva, che coinvolge i ragazzi, in cui i ragazzi sono protagonisti e quindi li diverte e li interessa e spesso li fa anche «comprendere».

L'aspetto del sentimento, o dell'emozione, va inquadrato nella più generale educazione a *imparare ad aver cura*, nell'ambito di un'educazione ambientale intesa in senso ampio: imparare ad *aver cura* smobilita il desiderio di possesso, la logica manageriale che ci fa pensare di essere importanti perché controlliamo le cose e ci fa recuperare la consapevolezza che la responsabilità primaria dell'essere umano è quella di *aver cura* della vita, non di manipolarla ma di custodirla, non di sfruttarla ma di coltivarla. L'etica della *cura* richiede per sua natura il coinvolgimento della sfera dei sentimenti, l'*aver cura* è messo in moto da una ragione impregnata di emozioni: compartecipazione empatica con il mondo della vita.[1]

NOTE

[*] Testo dell'intervento al convegno *L'editoria scientifica per bambini, ragazzi e giovani*, realizzato per l'edizione 2006 di Pianeta Galileo e svoltosi a Scandicci, presso l'Istituto Russell-Newton il giorno 10 novembre.

[1] Per seguire il nostro lavoro editoriale, vi rimando al nostro sito www.editorialescienza.it.

Scienza e società



Risorse energetiche*

Renato A. Ricci

Presidente onorario della Società Italiana di Fisica

0. Introduzione

> La struttura della società moderna, lo sviluppo socio-economico e culturale, il tenore e la qualità della vita, il livello di civiltà e di indipendenza politica di una nazione dipendono sempre più dal suo potenziale energetico e dall'efficienza dei sistemi di conversione e di utilizzo di esso.
>
> L'aspetto dominante dell'attuale fase di sviluppo delle comunità umane è la *crescente domanda di energia* e *l'aumento del suo consumo pro-capite.* È quindi il *valore assoluto* di tale fabbisogno che conterà nei prossimi decenni, accentuato peraltro dall'espansione sociale e demografica dei Paesi in via di sviluppo, i quali hanno già compiuto o si accingono a compiere radicali mutamenti di struttura al fine di trasformare la loro esistenza in un sistema di vita più complesso ed avanzato.
>
> Sulla base di significative previsioni, l'indice demografico mondiale si porterà, nella prima metà del prossimo secolo, a 8-9 miliardi di persone ed il corrispondente indice di consumo energetico salirà a 15-20 miliardi di tep (tonnellate equivalenti di petrolio) il doppio cioè dell'attuale.
>
> Ciò significa che *il problema energia ha dimensioni planetarie* ed i conseguenti aspetti scientifici, economici, sociali, culturali e politici non possono essere affrontati con pregiudizi, improvvisazioni e schematismi ideologici fuori della portata storica di tale problema ...

È con questa dichiarazione, firmata da Edoardo Amaldi, Ferdinando Amman, Nicola Cabibbo, Carlo Castagnoli, Donato Palumbo, Renato Angelo Ricci, Carlo Rubbia, Giorgio Salvini e ClaudioVilli e sottoscritta da quasi 1000 fisici italiani che nel 1987, ad un anno circa di distanza dal disastro di Chernobyl e prima della Conferenza Nazionale dell'energia e del famoso referendum che sancì, purtroppo, l'uscita del nostro Paese dalla produzione di energia nucleare, al contrario di tutti i principali paesi europei e del mondo industrialmente sviluppato, la Società Italiana di Fisica si espresse chiaramente sulla crisi energetica italiana.

In effetti il problema energetico è sicuramente il principale tra le questioni che riguardano l'evoluzione pacifica della società moderna. L'energia è alla base di ogni forma di sviluppo materiale e sociale dell'umanità, della sua sopravvivenza alla civiltà più avanzata.

Energia vuol dire possibilità di ottenere *lavoro* o più semplicemente di produrre

spostamenti o *movimenti* (*Energia cinetica*). Non sempre però si realizzano movimenti e l'energia accumulata o immagazzinata in attesa di essere utilizzata è *Energia Potenziale*.

E ancora: tale energia invece di produrre lavoro si può liberare sotto forma di *Calore.*

L'Energia *si misura* così come il Lavoro e il Calore. Le unità di misura più generalmente usate sono il *Joule* (Lavoro) e la *Caloria* (Calore) ma è più comune, anche perchè legata al concetto di *Potenza* (e all'uso dell'*Energia elettrica*), il *kilowattora* (kWh)

La Potenza di qualunque corpo o strumento che implica l'energia che esso è capace di esprimere nell'unità di tempo (*il secondo*) è appunto data dal rapporto

$$\text{Potenza} = \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo}}$$

e si misura in Watt: 1 Watt = J/sec. Si ha: 1 kW = 1000 Watt, 1 kilowattora = $3.6 \cdot 10^6$ Joule = $8.6 \cdot 10^2$ k Cal.

Le misure correnti che riguardano invece l'energia prodotta dai vari combustibili si ottengono con le seguenti equivalenze 2: 1 tep (tonnellata equivalente di petrolio) = 42 GJ ~ 10000 MCal ~ 11.700 kWh ~ 1,4 tec (tonn. eq. di carbone) ~ 1200 m^3 Gas.

Per avere un'idea del significato pratico delle quantità di energia d'uso comune sono riportati, nella Tabella I, il contenuto energetico di vari prodotti e, in Tabella II la potenza e l'energia erogata in 8 ore per vari strumenti o macchine, compreso il corpo umano.

Tabella I

Il contenuto energetico dei prodotti

1 kg di grano	1-2 kWh
1 kg di ferro	10 kWh
1 kg di proteine animali	15 kWh
1 kg di alluminio	70 kWh
un trattore agricolo	oltre 10.000 kWh

Tabella II

Utenza	*Potenza (kWh)*	*Energia in 8 ore*
Lampadina media	0,06	0,48
Scaldabagno	1	8
Trapano elettrico	0,7	5,6
Automobile media	50	400
Televisore	0,15-0,25	1,2-2
Stufa elettrica	1-2	8-16
Radio a transistor	0,0005	0,004
Locomotiva elettrica	3.000	24.000
Asciugacapelli	0,6-1,2	4,8-9,6
Essere umano	0,06	0,48

È chiaro inoltre che l'energia e quindi il soddisfacimento dei bisogni che derivano dai consumi energetici costituisce non solo un fattore essenziale per lo sviluppo delle civiltà ma anche un motivo di *stabilità* o instabilità delle società umane essendo una causa prima del *grado di benessere*, ossia della cosiddetta *qualità della vita.*

La fig. 1 illustra l'andamento di due *indicatori* di questa qualità in funzione del *consumo di energia annuale pro-capite*, espresso in kilocalorie: la *mortalità infantile* (morti su mille nati) e la *longevità* (aspettativa di vita in anni). Si vede come la prima scenda rapidamente e la seconda salga all'aumentare del consumo energetico (procedendo cioè dai paesi più sviluppati a quelli in via di sviluppo e meno sviluppati). La media (in cui entra ovviamente la grande differenza fra i primi ed i secondi) è all'incirca di 30 – 40.000 KWh che corrisponde al consumo medio di un italiano (circa 3 tep).

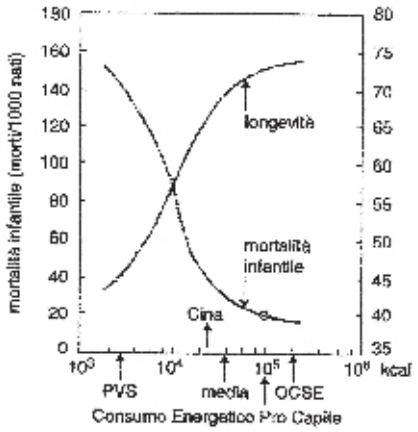


Figura 1 - Indicatori di benessere (mortalità infantile e longevità) in funzione dei consumi energetici.

Si noti che se il consumo di un italiano fosse accessibile agli abitanti dei Paesi in via di sviluppo (PVS) il consumo totale di energia nel mondo salirebbe a 20 Gtep (20 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio), ossia *circa il doppio di quello attuale.* Ciò sta a dimostrare quanto sia essenziale una strategia globale del problema energia.

La crescita dei consumi mondiali di energia primaria è riportata in fig. 2, insieme con l'andamento della popolazione del pianeta dal 1850 in poi.

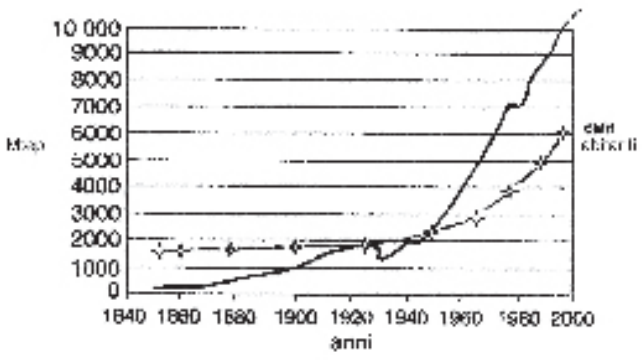


Figura 2 - Evoluzione della popolazione (≤) e dei consumi energetici (linea continua) del pianeta dal 1850.

Si vede che, a partire dal 1950, la crescita energetica sale molto più rapidamente fino a toccare per i 6 miliardi di abitanti degli anni 2000, i 10 Gtep di consumi di energia primaria.

Un'analisi dettagliata dello IIASA (Istituto Internazionale di Analisi dei Sistemi) di Vienna rende conto dell'evoluzione dei consumi globali che procede ad un tasso di circa il 2% annuo (vedi fig. 3).

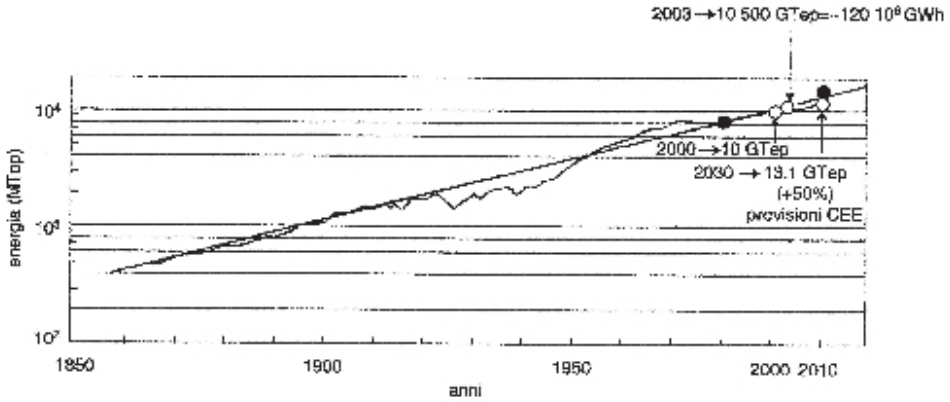


Figura 3 - Crescita (esponenziale) dei consumi energetici mondiali e analisi logistica della IIASA (scala logaritmica) .

In valore assoluto tale fabbisogno è arrivato ormai a circa 11 Gtep, pari all'utilizzo di 11.000 centrali da 1000 MW, di cui circa il 14% per la produzione di energia elettrica.

Le varie fonti primarie, dal legno al carbone, al petrolio, al gas naturale, all'energia nucleare, alle energie rinnovabili, si sono succedute e si succedono convivendo e sostituendosi mano a mano per motivi di convenienza economica, di adattabilità sociale, di possibilità tecniche e di impatto ambientale. Esse come tutte le innovazioni,

si sviluppano ad ondate successive riproducibili secondo equazioni logistiche (equazioni di Volterra), consistendo e superandosi come mostra la fig. 4.

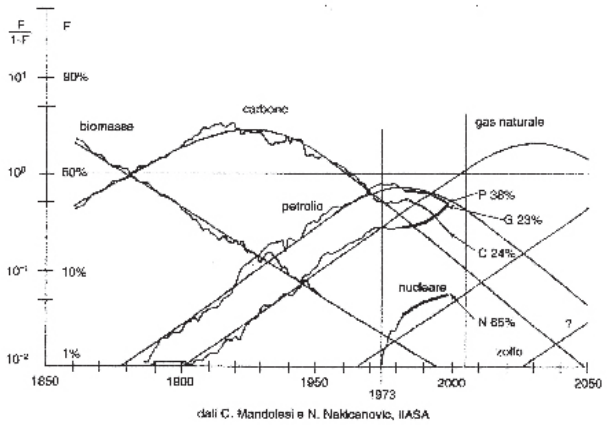


Figura 4 - Evoluzione logistica delle varie fonti primarie di energia (analisi IIASA, vedi testo).

Oggi la convivenza e la competitività delle fonti di energia più utilizzate, utilizzabili e disponibili *su larga scala* riguarda soprattutto il petrolio, il gas naturale, il carbone e, sia pure in misura ancora meno rilevante, l'energia nucleare da fissione.

L'attesa di ulteriori nuove fonti (fusione, solare?) fa parte di questo secolo. In ogni caso una fonte che abbia penetrato circa il 5% del mercato non torna più indietro.

1. Fonti energetiche: classificazione

Le Fonti energetiche primarie. Esse derivano direttamente da risorse naturali presenti nel pianeta o, più in generale, nell'Universo e, sostanzialmente, si tratta di energia potenziale concentrata che mano a mano l'uomo ha scoperto e poi utilizzato.

Naturalmente vi sono forme di energia che liberandosi in modo incontrollato danno luogo ad «esplosioni» (nell'Universo le esplosioni stellari, le Supernovae, l'energia nucleare del sole e delle stelle) che, se usate dall'uomo (ad esempio l'energia chimica, la dinamite, le bombe a energia chimica o nucleare) servono solo a scopi distruttivi e militari.

Qui ci interessiamo ovviamente delle forme di energia controllabili e controllate ad uso civile e pacifico sia che siano già esistite in natura (combustibili fossili, acqua, vento, geotermia) sia che siano frutto di scoperte e invenzioni scientifiche (energia nucleare, fotovoltaica...).

Le fonti primarie, come detto, possono essere sfruttate direttamente. Vi sono forme di energia *secondarie* che derivano dalla trasformazione delle prime, con opportuni accorgimenti tecnici, nelle seconde. Tra queste la più nota, anche perchè molto pregiata, flessibile e facilmente utilizzabile, è l'*energia elettrica.*

Altre forme di energia secondaria sono ovviamente l'energia *termica* (calore) e l'energia *meccanica* (movimento).

Classificazione delle energie primarie

Le fonti energetiche primarie utilizzate nel mondo (tecnologie disponibili) si distinguono in:

1. fonti energetiche *fossili*
2. fonti energetiche *nucleari*
3. fonti energetiche *rinnovabili*

LE FONTI ENERGETICHE ***FOSSILI*** sviluppano *energia termica* in seguito a *trasformazione chimica* (processo di combustione) e sono le seguenti:

- Petrolio
- Carbone
- Gas naturale

LE FONTI ENERGETICHE ***NUCLEARI*** sviluppano *energia termica* in seguito a *trasformazione nucleare* (processo di fissione o di fusione) e sono le seguenti:

- Uranio
- Plutonio
- Torio

} fissione

- Deuterio
- Trizio

} fusione

LE FONTI ENERGETICHE ***RINNOVABILI*** sviluppano energia *meccanica, termica o elettrica* in seguito a *trasformazioni chimiche o fisiche e s*ono le seguenti:

fonti rinnovabili classiche:

- energia idraulica
- energia geotermica

nuove fonti rinnovabili:

- energia eolica (vento)
- energia solare (termica, fotovoltaica)
- combustibile derivato dai rifiuti (CDR)
- biomassa (legna)
- biocombustibili (etanolo, biogas).

L'impiego delle fonti energetiche. Le fonti energetiche primarie non sono automaticamente sostituibili tra loro, in quanto hanno caratteristiche intrinseche diverse che riguardano:

- il tipo di energia producibile (termica, meccanica, elettrica)

- la potenza specifica (energia per unità di massa, volume, superficie occupata dagli impianti)
- la disponibilità (costante, periodica, casuale)
- i costi di approvvigionamento
- i costi di trasformazione (impianto e manutenzione)
- l'impatto ambientale e i rischi associati.

Gli usi prevalenti dell'energia. Il fabbisogno prevalente di fonti energetiche riguarda

- la produzione diretta di mobilità (trasporti)
- la produzione diretta di calore
- la produzione di elettricità

Mentre i primi due sono usi finali, il terzo è un uso intermedio ed è finalizzato alla trasformazione delle fonti primarie in una forma di energia particolarmente idonea all'uso differenziato e alla distribuzione su larga scala.

Nei paesi industrializzati avanzati

- il 33% dell'energia primaria è utilizzato per produrre mobilità
- il 33% dell'energia primaria è utilizzato per produrre calore
- il 33% dell'energia primaria è utilizzato per produrre elettricità

Storicamente l'uso delle fonti di energia (essenzialmente energia solare) nel Neolitico era limitata alla produzione (o procacciamento) di cibo. Già al tempo dei Sumeri si ha una suddivisione tra produzione di cibo, usi domestici e terziario, industria ed agricoltura. L'utilizzazione consistente di energia per trasporti (mobilità) si ha a partire dal XVIII sec. e nel XX sec., a parte una frazione ormai minoritaria per la produzione di cibo, si ha una distribuzione quasi paritaria fra usi domestici e terziario, industria e agricoltura e trasporti (vedi fig. 5).

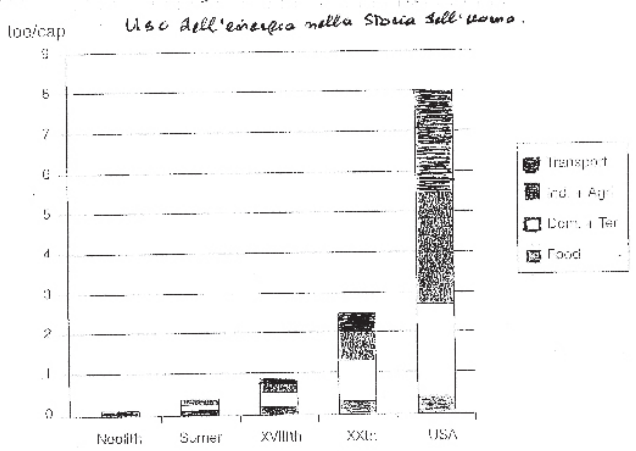


Figura 5 - Uso dell'energia nella storia dell'uomo
(cibo, usi domestici e terziario, industria ed agricoltura, trasporti).

Fonti «alternative» e «integrative». Le fonti energetiche primarie sono dunque considerate »alternative» o « integrative» sulla base della loro attitudine a produrre

- mobilità
- calore
- elettricità

a condizioni confrontabili di

- versatilità
- disponibilità
- costo.

Usi delle fonti energetiche primarie

Usi finali possibili	Calore	Mobilità	Elettricità
Carbone	Sì	Sì	Sì
Petrolio	Sì	Sì	Sì
Gas naturale	Sì	Sì	Sì
Nucleare	Sì		Sì
Energia idraulica			Sì
Energia geotermica	Sì		Sì
Energia solare	Sì		Sì
Energia eolica			Sì
Energia da CDR	Sì		Sì
Energia da biomassa	Sì		Sì
Energia da biocombustibili	Sì	Sì	Sì

2. Fonti energetiche: storia

Nella Preistoria dell'umanità (5 milioni di anni fa): Austrolopiteco; 2 milioni di anni fa: Homo Abilis; 1,5 milioni di anni fa: Homo Erectus e fino a 300.000 anni fa, l'unica fonte di energia disponibile ai nostri antenati erano essi stessi, il loro corpo, le loro braccia che consumavano energia nutrendosi. L'Homo Erectus ad esempio è vissuto per ben un milione e 200 mila anni a livello animale o quasi, senza vestiti e ripari dipendendo dagli animali stessi per i suoi bisogni e limitandosi al necessario per la sopravvivenza. Si valuta che il *consumo energetico annuo pro-capite* fosse di 1,1 MEGACALORIE/UOMO-ANNO (MCal/u.a).

Questa *1ª tappa* coincide con la *scoperta del FUOCO:* Il fuoco viene usato per distruggere boschi e farne praterie per la caccia, per ardere legna per riscaldarsi e proteggersi dalle belve, per costruire imbarcazioni e percorrere *corsi d' acqua.* Il consumo energetico sale a 2,2 MCAL/U.A. (il doppio della preistoria).

La *2ª tappa* si ha con la scoperta dell'*AGRICOLTURA*, nel 7000 avanti Cristo. Si tratta della prima rivoluzione ecologica dell'uomo che interviene sulla natura e moltiplica i

vegetali modificandone il corso naturale con la semina e la raccolta controllata. Diventa più *sedentario* (costruzioni e abitazioni stabili, lavoro nei campi da parte dell'Uomo e con l'aiuto di animali resi domestici). Nascono comunità e categorie sociali a seconda del lavoro effettuato, le prime rudimentali città Si cuociono i cibi di origine sia animale che vegetale (e si bolliscono in acqua); si esercitano le prime forme di arte decorando i vasi di terracotta con i minerali di rame forgiati con il fuoco. Il *fabbisogno energetico* si raddoppia ancora e sale a 4,5 MCAL/U.A.

La *3ª tappa* si ha nel 4000 a.c. quando nasce la *METALLURGIA,* lungo periodo che va dall'età del bronzo all'età del ferro, dando luogo al *periodo propriamente storico* dell'umanità, così come noi lo conosciamo. Cominciano le *specializzazioni tecniche*, le *suddivisioni del lavoro* che originano le *classi sociali* (anche la schiavitù), la fabbricazione e l'uso di *utensili*, lo sfruttamento di *FONTI NATURALI di ENERGIA* (Acqua, Vento, Sole) oltre al *Fuoco,* utilizzate per *trasporto e riscaldamento.* È questo anche il periodo in cui hanno inizio e fioriscono la scrittura (Asia Minore, Egitto, Cina), la contabilità, il capitalismo agrario, forme più evolute di arte. Tuttavia il fabbisogno energetico pro-capite resta *costante*, grazie ad una maggiore efficienza nell'uso di energia.

La *4ª tappa* inizia con l'uso del *MULINO ad ACQUA* (1° secolo a.C.) a partire dai Greci poi sviluppato dai Romani (potenza 2,2 kW) fino al 3° secolo d.C., mentre il *MULINO A VENTO* viene introdotto dagli Arabi verso il 650 d.C., anche se esso era già usato nel 400 d.C., ma in modo limitato in Persia ed in Afghanistan e il vento era ben utilizzato nella navigazione a vela da 3-4000 anni prima. Anche in questo periodo e fino all'Ottocento i consumi energetici non aumentano molto e arrivano a 5 MCAL/U.A.

La 5ª tappa, in cui il fabbisogno energetico rimane costante, vede la scoperta o meglio l'invenzione della *POLVERE DA SPARO* (1300 d.C.) che è la prima vera *ENERGIA ARTIFICIALE* (sintesi tra sostanze naturali) non esistente in natura. Essa dà inizio alle *ARMI DA FUOCO* che rivoluzioneranno le battaglie militari e le guerre. Naturalmente la polvere da sparo può essere utilizzata come esplosivo per frantumare rocce, scavare miniere, studiare il sottosuolo. Ed anche come propulsore di proiettili nei cannoni. La costruzione di questi ultimi sviluppa la *siderurgia* e, in particolare, la *fusione dell'acciaio*, il che fa aumentare la necessità di molto calore e quindi di nuove fonti energetiche, oltre al legno e si apre l'era del *CARBONE FOSSILE* (1600-1700).

6ª tappa: arriva il grande salto qualitativo che impone un salto quantitativo. Siamo alla *RIVOLUZIONE INDUSTRIALE.* Si introduce, verso il 1600, l'utilizzazione del CARBONE FOSSILE e si scopre l'energia contenuta nel vapor d' acqua e viene inventata, nel 1800, la *Macchina a Vapore*, in cui l'energia prodotta viene *indirizzata* a seconda delle esigenze e non più a seconda delle disponibilità naturali (come con il vento e il sole).

7ª tappa: arriva il *PETROLIO* (1890) seguito poi dal *GAS NATURALE* (METANO) e con gli *IDROCARBURI* si ottengono i *CARBURANTI* necessari per intensificare i TRASPORTI con maggiore velocità via *automobilistica* e *aerea*. Una nota curiosa che dimostra la capacità delle società di compensare con reazioni opportune eventuali rischi ambientali[3], è data dall'avvicendamento tra il cavallo e l'auto come mezzo sociale di trasporto.

Nel 1920, negli USA, il mezzo più comune di trasporto era il cavallo (25 milioni di cavalli) ma cominciava l'era dell'automobile, che tuttavia, per velocità e costo, non era affatto competitiva con il cavallo. Il fatto discriminante fu il problema dei parcheggi notturni e delle *emissioni*: 20 chili al giorno per cavallo!

«Anche se ai contadini della mia giovinezza e ai Verdi di oggi vengon le lacrime al pensiero, la società nel suo insieme scelse il mezzo meno inquinante (più ecologico): *l'automobile!*» – è quanto afferma Cesare Marchetti, uno degli autori delle analisi più accreditate di sviluppo delle fonti energetiche, condotta dallo IIASA (Istituto Internazionale di Analisi del Sistemi) di Vienna.

8ª tappa: nel 1945 nasce l'*ENERGIA NUCLEARE*. La prima dimostrazione della possibilità di produrre la *REAZIONE A CATENA* derivante dal bombardamento di Uranio 235 con neutroni lenti e di innescare la *SCISSIONE dei NUCLEI* con grande produzione di energia fu ottenuta nel 1942 con la *PILA di FERMI* a Chicago. Purtroppo le prime applicazioni di questa energia sono state a scopi distruttivi (BOMBA ATOMICA, più precisamente NUCLEARE); tuttavia essa costituisce, se usata a scopi pacifici e civili, una grande opportunità per competere, nel soddisfacimento dei fabbisogni energetici mondiali, con i combustibili fossili. Le *centrali elettronucleari* coprono oggi il 17% dell'energia elettrica mondiale. I consumi mondiali di energia sono arrivati a circa 35 MCAL/U.A.

Per il futuro, a parte l'uso e la diversificazione delle fonti di cui si è parlato (con miglioramenti e innovazioni tecnologiche e maggiore efficienza di utilizzazione), speranze sono riposte soprattutto sulla FUSIONE NUCLEARE, di cui si prevede l'eventuale utilizzo non prima del 2040.

Per meglio comprendere l'evoluzione storica dei consumi energetici dell'umanità, si pensi che per esempio in Inghilterra nel 1800 si consumavano 0,55 tep/anno pro-capite, nel 1900 2,8 e nel 2000 si è arrivati a 3,5; e che in Italia tale consumo nel 1900 era di 0,5 tep/anno pro-capite con una frazione agricola del PIL (Prodotto Interno Lordo) del 50% e si è arrivati nel 2000 a 3 tep/anno pro-capite con una frazione agricola del PIL del 3,3%.

3. Origine e uso delle fonti energetiche

LE FONTI FOSSILI (*carbone, petrolio, gas naturale*) appartengono alla categoria dei combustibili, rispettivamente solidi, liquidi e gassosi.

La *combustione* è una *reazione chimica* che avviene tra una sostanza (combustibile) e un' altra (comburente) con notevole sviluppo di calore (*Energia Termica)*. Il comburente è generalmente l'*ossigeno*; i combustibili fossili sono formati, in generale, da *Carbonio* e *Idrogeno*, in varie percentuali. Questa è la ragione per cui nella combustione si forma, tra i vari altri prodotti, il *BIOSSIDO di CARBONIO* (o *Anidride Carbonica*, la CO_2) uno dei gas a *EFFETTO SERRA*.

A parte il Carbone, che contiene poco idrogeno, il Petrolio e il Gas naturale, per il fatto di contenere parti consistenti di C e H, sono detti *IDROCARBURI*. È pertanto la parte in Carbonio che costituisce la causa principale dell'inquinamento prodotto da

tali fonti.

- Il *carbone fossile* si trova in natura e deriva dalla carbonizzazione di vegetazione depositata negli strati più profondi del terreno e per ciò viene chiamata «*fossile*». Esso viene utilizzato nei «*motori a combustione esterna*» (motori a stantuffo e turbine a vapore) e per la produzione di *energia elettrica.*
- Il *petrolio grezzo* si trova in natura ed è una miscela di sostanze, alcune non essenziali e perfino nocive. Pertanto esso deve essere «*distillato*» (*distillazione frazionata)* per produrre sostanze più pregiate (GPL, Benzina, Kerosene, Gasolio, residui di distillazione) i quali servono per i motori a combustione esterna e *interna* (motori a scoppio, motori Diesel) e per la produzione, meno interessante, di energia elettrica. Un'applicazione interessante è la trasformazione in sostanze solide ma malleabili come la PLASTICA e altre materie chimiche. Il petrolio viene estratto nei Pozzi e nelle piattaforme petrolifere e si trova soprattutto in regioni particolari, il che dà luogo a problemi geopolitici ben noti (vedi Iraq, Kuwait, Iran) oltre che paesi come il Venezuela, la Russia.
- Il *Gas naturale*, in particolare il *metano* (CH_4) è molto diffuso, brucia molto bene, è meno inquinante del Carbone e del Petrolio ed è molto calorifico. Viene usato abbondantemente sia per usi domestici, produzione di calore, trasporti, che per usi industriali (energia elettrica con *impianti a ciclo combinato*), sostituendo anche il *gas di città* destinato a scomparire. Il gas naturale accompagna spesso il petrolio (molto più raramente avviene il viceversa). In effetti, ai primordi dell'era petrolifera, il gas era considerato più un disturbo che un prodotto pregiato. Esso cominciò a venire utilizzato come combustibile importante quando (negli USA, 1935) si riuscì ad ottenere tubature efficienti e sicure per trasportarlo (*gasdotti*). La diffusione negli altri continenti avvenne dopo la seconda guerra mondiale (metanodotti Russia, Algeria, Iran, Africa settentrionale, Nord Europa). La grande diffusione attuale è dovuta anche al minor inquinamento rispetto al carbone e al petrolio.

Per la produzione di energia elettrica le *centrali termoelettriche* (che usano tali combustibili) funzionano secondo lo schema di fig. 6.

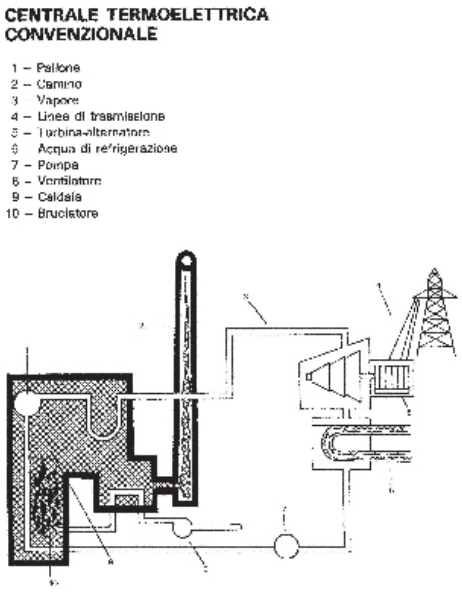


Figura 6 - Schema di centrale termoelettrica convenzionale. Un bruciatore (a gas metano, a carbone, a olio pesante, ecc.) riscalda dell'acqua, trasformata in vapore che è quindi inviato ad una turbina. In una centrale elettronucleare il bruciatore e la caldaia sono sostituiti dal recipiente contenente il nocciolo in cui avvengono le reazioni a catena.

La potenza standard di questi impianti è di 800-1000 MW.

Riassumendo i combustibili fossili che coprono attualmente più dell'80% dell'energia primaria mondiale hanno anche il pregio della versatilità nella loro utilizzazione (mobilità, calore, energia elettrica) mentre le fonti che ora andremo ad esaminare (nucleare e fonti rinnovabili) sono prevalentemente utilizzate per la produzione di energia elettrica oltre che in qualche caso (solare e nucleare) per la produzione di calore.

LE ENERGIE RINNOVABILI (E/O INTEGRATIVE). Come si è detto esse si distinguono in fonti «classiche» (idroelettrica e geotermica) e «nuove». Questa distinzione è tuttavia solo tecnica e serve a distinguere forme di utilizzazione in uso da tempo nella società moderna e altre che, pur essendo note fin dall'antichità (vento, solare, biomasse) sono state riconsiderate alla luce di interventi tecnologici solo oggi possibili e al loro uso per la produzione di energia elettrica. Fa eccezione il solare fotovoltaico, che si basa su una scoperta scientifica (l'effetto fotoelettrico) dell'era moderna (così come l'energia nucleare). Ci riferiamo quindi nel seguito a queste fonti come energie primarie utilizzate nelle centrali elettriche.

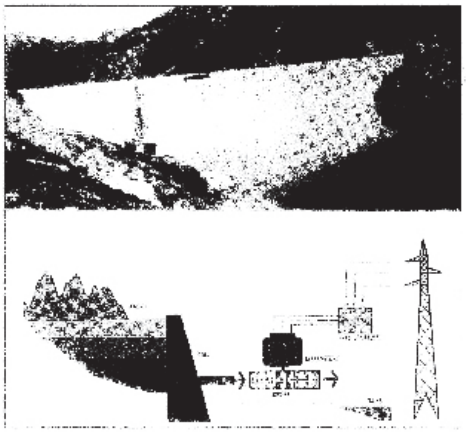
Energia Idroelettrica

Le centrali idroelettriche sono il tipo più semplice di centrale per la produzione di energia elettrica. Sono costituite da una turbina idraulica, cioè azionata dall'acqua, che fa girare un alternatore; l'acqua deve naturalmente trovarsi ad un livello più alto di quello della turbina e deve essere convogliata, con opportuni mezzi, fino alla turbina stessa. La spinta dell'acqua sulle palette della turbina provoca la rotazione di quest' ultima e, quindi, del rotore dell'alternatore, che genera l'energia elettrica.

Partendo dall'alto, cioè dal livello superiore, troveremo quindi:

- un serbatorio d'acqua ad alta quota;
- una condotta per portare l'acqua fino al livello della turbina (condotta forzata)
- organi di intercettazione;
- organi di regolazione, per graduare la quantità d' acqua e, quindi, la potenza di funzionamento dell'impianto;
- la turbina;
- un bacino per la raccolta dell'acqua a bassa quota (vedi fig. 7)

La potenza erogata (lavoro a unità di tempo) si può ottenere dal rapporto L/t. Essendo L=Mgh dove *M* è la massa d' acqua che cade da un dislivello *h*, e *g* l'accelerazione di gravità, basterà moltiplicare la «portata» dell'acqua (m^3/sec) per h e per g. Ad esempio per un dislivello di 750 metri ed una portata di 160 m^3/sec (160.000 kg/sec) si ha una potenza di 1.200.000 Watt, ossia 1200 Mwatt che è una potenza abbastanza usuale per un grande bacino idroelettrico.



In alto: un bacino idroelettrico. In basso: lo schema di principio di una centrale idroelettrica.

Figura 7.

Osserviamo che l'*impatto ecologico* di una centrale idroelettrica, anche se completamente priva di emissioni e quindi di effetti dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico non è certamente trascurabile. I rischi sono ovviamente legati alla possibilità di cedimento delle dighe di sbarramento, certamente non frequente ma non impossibile, come dimostrano disastri accaduti negli Stati Uniti, in Francia e in Italia; in quest' ultimo caso (Vajont), nel 1963, non si trattò di cedimento della diga ma fu il bacino a traboccare per effetto della caduta in esso di una falda montana, causando la distruzione del paese di Longarone e la morte di 2000 persone. Inoltre la realizzazione di un grande bacino ha un impatto sugli equilibri ambientali non indifferente.

Energia Geotermica

Sfrutta il calore naturale della terra. Si tratta di acqua o vapore caldo che viene esalato per pressione dalle profondità terrestri. Esso viene sfruttato a causa della sua temperatura più alta di quella ambientale. In genere le potenze sono modeste. L'Italia, che è all'avanguardia nello sfruttamento di questa fonte di energia (*bacino geotermico* di Larderello, in Toscana i cosiddetti «*soffioni boraciferi*») ha oggi in funzione 13 centrali *geotermoelettriche* per una potenza complessiva di 400 MW.

Energia da Biogas e Biomasse

Il biogas è un gas combustibile proveniente dal letame delle fattorie, opportunamente trattato. La centralina azionata dal biogas è una centrale turbogas in miniatura, in grado di fornire una potenza di una decina di kW.

Le biomasse sono tutti i materiali organici, di origine animale o vegetale, che possono essere trasformati in fonti di energia. Sono esempi di uso di biomasse l'idrolisi acida ed enzimatica per la produzione di alcool e derivati e l'uso di reazioni di fotosintesi per la produzione di idrogeno, che può funzionare da vettore energetico. Lo sfruttamento può essere conveniente nei luoghi in cui la materia prima è a portata di mano, come le campagne e le fattorie; non sempre è conveniente nelle grandi città per motivi opposti.

Energia dai rifiuti urbani

Più che un sistema per produrre energia, questo è un sistema per l'eliminazione dei rifiuti, in quanto il potere calorifico degli stessi è molto basso. I rifiuti vengono infatti bruciati insieme a normale combustibile (inceneritori, termovalorizzatori). Il sistema ha attraversato negli ultimi anni una importante evoluzione tecnologica che consente, qualora si utilizzino le tecnologie più avanzate, di limitare notevolmente le emissioni inquinanti.

Energia Solare

Qui entriamo nel campo delle energie *rinnovabili vere e proprie* poichè non vi è bisogno di combustibile apposito, l'energia primaria provenendo direttamente dalla natura (sole, vento e acqua per l'idroelettrico). Occorre tuttavia precisare che di energia solare si tratta anche quando parliamo, ad esempio, di combustibili fossili, perchè è energia proveniente dal sole che è stata *capitalizzata* nei fossili in tempi geologici di milioni di anni.

L'energia solare intesa come fonte primaria *diretta* è quella che *il sole invia annualmente sulla terra*. Essa dipende dall'*insolazione*, ossia da quanta *potenza* investe ogni metro quadrato della superficie terrestre (*potenza specifica*) e che può essere utilizzata. Ed è qui che sta il limite fisico di tale fonte, che non è *concentrata* ed è *molto diluita* (diffusa). Questa *potenza specifica media* è di circa 200 Watt/m^2.

Il principale vantaggio dell'energia solare è che la fonte di energia è del tutto gratuita e non inquinante. Al contrario, le installazioni sono generalmente molto costose ed ingombranti e generano energia utilizzabile solo a livello locale. Questo

tipo di energia si presta molto bene per il moderato riscaldamento dell'acqua, ma non certo per generare le grandi quantità di energia necessarie per il funzionamento di una nazione industrializzata in quanto la potenza disponibile non supera circa un kW per ogni metro quadrato di superficie investita dai raggi solari.

L'utilizzazione di questa energia segue 3 vie:

- produzione di calore a bassa temperatura
- conversione termodinamica
- conversione fotovoltaica.

In tutti e tre i casi il principio base è quello di raccogliere le radiazioni solari mediante opportuni dispositivi e concentrarle in modo che siano utilizzabili. È lo stesso principio che si applica quando appicchiamo il fuoco ad un pezzo di carta concentrando i raggi solari mediante una lente di ingrandimento. Questi dispositivi vengono chiamati «*collettori solari*». L'energia raccolta, nei tre casi suddetti, viene sfruttata nei seguenti modi:

- Nel caso della «produzione di calore a bassa temperatura» viene usata direttamente per il riscaldamento dell'acqua fino ad una temperatura di circa 50oC. Nel caso della «conversione termodinamica» l'energia viene raccolta da specchi e viene concentrata su una caldaia posta su una torre; la caldaia produce vapore che aziona una piccola turbina (fig. 8).

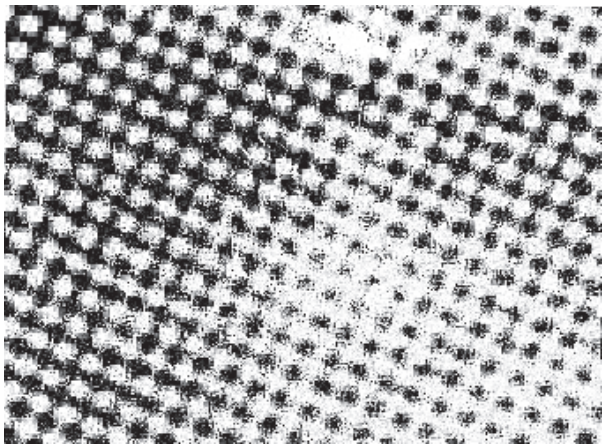


Figura 8 - Il campo specchi della centrale solare Number One in California (USA).

- In Italia è stato fatto un importante esperimento di conversione termodinamica ad Adrano. In provincia di Catania, della potenza di circa un MW. Per dare un' idea delle dimensioni, basti sapere che la superficie complessiva degli specchi è di 6.200 metri quadrati, e il territorio complessivamente occupato è di 35.000 metri quadrati. Per avere un termine di paragone, approssimativamente le aree occupate rispettivamente dal campo di gioco e dall'intero stadio olimpico di Roma.

- Nel caso della «conversione fotovoltaica» l'energia portata dalle radiazioni solari su certi tipi di materiali (per esempio il silicio) induce l'estrazione di elettroni che opportunamente convogliati danno luogo a corrente elettrica (fotoni = luce, volt = differenza di potenziale elettrico). Si ha così produzione diretta di energia elettrica con una certa efficienza che tuttavia è limitata (<15%) (vedi fig. 9).

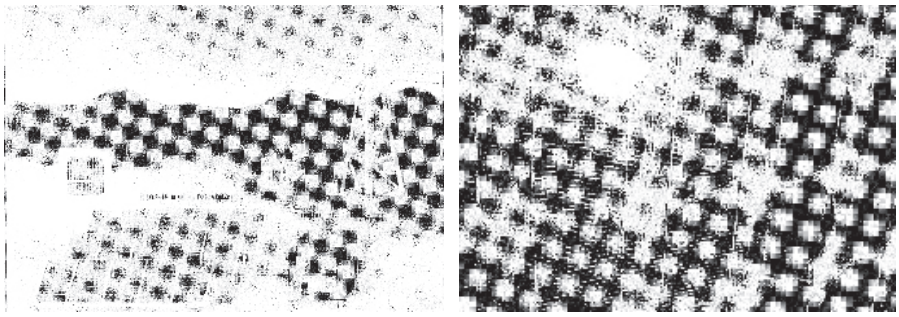


Figura 9a/b - Schema di principio di una centrale di conversione fotovoltaica (a sinistra) e particolare di celle fotovoltaiche (a destra).

Energia Eolica

È l'energia derivata dal vento, e prende il suo nome da Eolo, il mitico re dei venti della mitologia greca. Il principio, molto semplice, è quello di far girare un'elica, solidale con il rotore di un piccolo alternatore. In pratica, è molto simile al principio di funzionamento di un mulino a vento, solo che in questo caso l'energia non viene utilizzata direttamente come energia meccanica ma trasformata in energia elettrica (fig. 10).

Naturalmente si tratta di un' energia molto discontinua, come lo è il vento stesso, ed il miglior utilizzo può essere quello di impiegarla per caricare batterie di accumulatori, cioè immagazzinarla per utilizzarla in seguito in modo più continuativo.

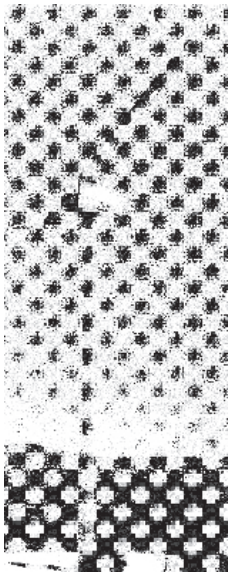


Figura 10 - Un generatore di una centrale eolica.

I generatori eolici di massima potenza raggiungono oggi 1 MW e hanno notevoli dimensioni (circa 80 metri di altezza e 30 metri di apertura delle pale) con un impatto spaziale non indifferente ed una efficienza dell'ordine dell'1%.

L'Energia Nucleare

È sicuramente una delle scoperte che hanno modificato il corso della storia umana. Tutte le fonti energetiche note e utilizzate dall'uomo fino alla fine dell'ottocento erano quelle che venivano dal sole, sia direttamente che indirettamente. Un bue può trascinare un aratro perchè mangia il fieno, il quale a sua volta cresce con la luce solare per la reazione clorofilliana. I combustibili fossili non sono altro che energia solare congelata nelle ere geologiche. Per essere precisi questo non è il caso dell'energia geotermica (calore latente della terra) e di quella delle maree (energia gravitazionale terra-luna) ma comunque il loro apporto non è molto rilevante. Restava da capire quale fosse l'energia che, a sua volta, sostiene il sole e le altre stelle.

La risposta venne data dall'energia nucleare, che nell'accezione più comune è quella che si ottiene dalla scissione o *fissione* di un nucleo pesante con un neutrone, con formazione di due o tre nuclei la cui massa complessiva è minore di quella del nucleo di partenza oppure dalla unione o *fusione* di due nuclei leggeri, con formazione di un nucleo la cui massa è minore della somma delle masse dei nuclei di partenza. In ambedue i processi si ha una perdita di massa e il rilascio di una grande quantità di energia, che si trasforma ben presto in calore. L'energia vale, seconda la ben nota equivalenza di Einstein, la perdita di massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce (300.000 km/s).

$$E = mc^2$$

La fissione è sfruttata industrialmente fin dagli anni '50. Essa è utilizzata nei reattori nucleari, che sono delle vere e proprie caldaie. La fusione è tuttora attivamente studiata per comprenderne pienamente la fenomenologia fisica e per dimostrarne la capacità di autosostenersi, cioè di produrre almeno l'energia necessaria al mantenimento della reazione. La possibilità di un suo sfruttamento industriale non è ancora del tutto certa e comunque dovrebbe avvenire in un futuro abbastanza lontano (2050?). Tuttavia la fusione è il processo che genera il calore delle stelle e quindi del sole.

I due processi sono schematizzati, in fig. 11.

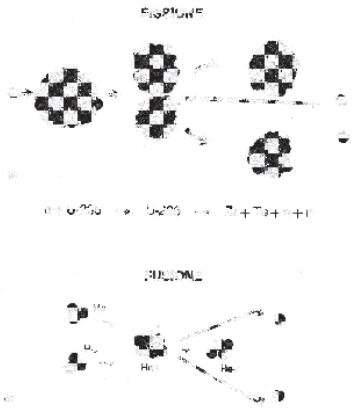


Figura 11a/b - Esempio di fissione dell'Uranio-235. 1ª fase: un neutrone urta un nucleo di U-235; 2ª fase si forma U-236 instabile; 3ª-4ª fase: il nucleo si spacca in due frammenti grossi (nel nostro caso Tellurio e Zirconio), e due piccoli frammenti corrispondenti a due neutroni. In molti casi i piccoli frammenti (neutroni) sono 3.
Esempio di fusione. Due nuclei di Trizio si fondono e generano un nucleo di Elio-4 (particella α) e due neutroni. Affinché i due nuclei iniziali possano «fondere» occorre superare la repulsione elettrica fra i protoni (cioè tra le sferette grigie); sotto una certa distanza la coesione tra nucleoni è molto più forte della repulsione elettrica.

Nel caso della fusione si ha la *sintesi* di 2 nuclei leggeri (esempio Deuterio D e Trizio T, due isotopi dell'Idrogeno): si forma un nucleo più pesante l'Elio (He) con emissioni di un neutrone e liberazione di energia. Nel secondo un nucleo pesante (esempio Uranio fissile, U235) bombardato da un neutrone si spacca (*scissione*) in due nuclei più leggeri (Bario e Kripton) emettendo altri neutroni e liberando energia.

Il fatto peculiare della fissione è che essa si *propaga* perchè ad ogni scissione si liberano più di un neutrone e si innesca una *moltiplicazione* di reazioni (*reazione* a *catena*, vedi fig. 12.)

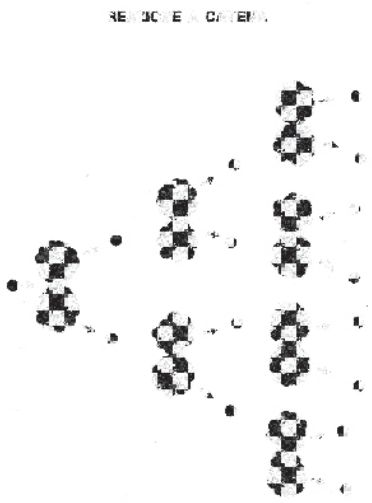


Figura 12 - Schema di reazione a catena (sferette nere=neutroni). Nel caso illustrato ad ogni «generazione» il numero di nuclei fissionati raddoppia (il fattore di moltiplicazione K è perciò uguale a 2).

Tale moltiplicazione può avvenire rapidamente e divergere fino all'*esplosione* (bomba)

oppure essere *controllata* (rallentando la reazione a catena con appositi *assorbitori* di neutroni, per esempio barre di Cadmio, che possono frenare il processo continuo di scissione ed anche *bloccarlo* e quindi *spegnere* il processo). Naturalmente occorre, per mantenere il processo, dare ai neutroni le velocità necessarie e più utili per scindere i nuclei di Uranio e per questo vanno *rallentati* con opportuni *moderatori* (per esempio grafite o acqua).

La potenzialità dell'energia nucleare è enormemente maggiore di quella dei combustibili fossili: un kg di petrolio può fornire 45 MJ (megajoule), mentre un kg di uranio naturale può fornire, usato in un reattore commerciale, 500.000 MJ (ovvero 10.000 volte di più).

La fissione ha tre caratteristiche fondamentali: 1) produce una grande quantità di energia, ii) è innescata da un neutrone e produce a sua volta neutroni, così da consentire l'autosostentamento della reazione. Iii) produce sostanze radioattive sia nel combustibile, l'uranio, sia negli altri elementi strutturali necessariamente presenti in un reattore nucleare.

La nascita dell'energia nucleare, come fonte alternativa di energia, si può far risalire alla seconda metà degli anni '60, quando si dimostrò concretamente che l'energia elettrica prodotta da un reattore nucleare era economicamente competitiva. Tra le più importanti fonti di energia per il soddisfacimento del fabbisogno energetico mondiale, l'energia nucleare è quella di più recente introduzione. Il suo contributo attuale è circa pari al 6% del fabbisogno energetico mondiale, praticamente tutto sotto forma di energia elettrica (16%). L'energia nucleare è una fonte molto importante per l'umanità ed è quindi opportuno che sia meglio conosciuta. Essa infatti è svantaggiata dal fatto di essere poco conosciuta, non intuibile, non utilizzabile in modo diffuso e soprattutto di essere implicitamente collegata, nell'immaginario collettivo, alle bombe atomiche. Tutto ciò ha facilitato il diffondersi di una sua immagine negativa al limite della demonizzazione, anche per l'azione di disinformazione di vari gruppi organizzati.

Nella fig. 13 sono riportati gli schemi semplificati dei reattori nucleari più usati (moderati e raffreddati ad acqua, bollente o a pressione) nei Paesi occidentali e più industrializzati, insieme con lo schema del reattore di Chernobyl (RBMK) moderato a grafite e, come si vede, privo di *contenitore esterno.*

Furono queste peculiarità a rendere più disastrato l'incidente del 26 aprile 1986 in Ukraina, dovuto fra l'altro a gravissimi errori nella gestione di un esperimento estremo da parte degli operatori della Centrale nucleare (fig. 13).

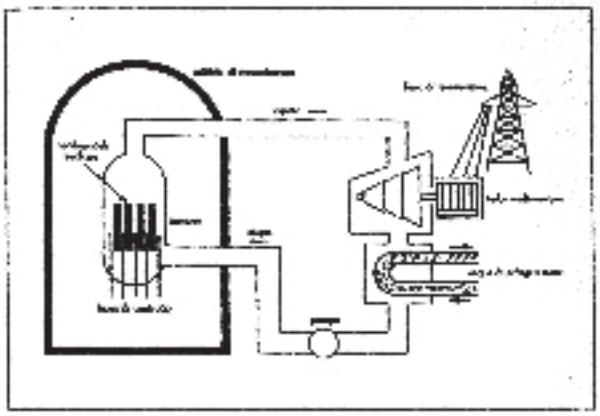


Figura 13a - Schema semplificato di un reattore ad acqua bollente.

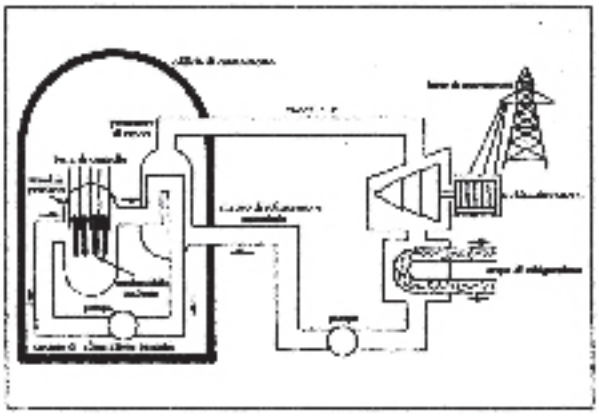


Figura 13b - Schema semplificato di un reattore ad acqua pressurizzata.

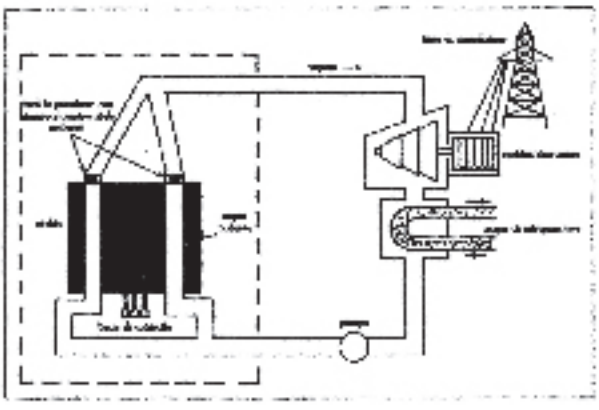


Figura 13c - Schema semplificato del reattore di Chernobyl (RBMK-1000).

Una cosa importante da ricordare è che, contrariamente ai luoghi comuni ampiamente diffusi e propagandati, la produzione di *energia elettronucleare*, dopo Chernobyl, è aumentata di oltre il 60%, passando da circa 1700 TWh a circa 2700 TWh (miliardi di kilowattore) (vedi fig. 14).

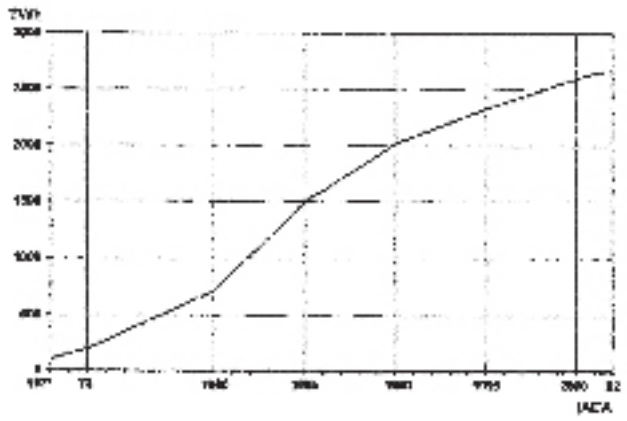


Figura 14 - Produzione mondiale di energia elettronucleare (1971-2002).

Nuove centrali sono in costruzione in Giappone, Corea, Cina, Russia e Finlandia. Inoltre il fatto che, grazie a significativi progressi tecnologici, la durata della vita di centrali nucleari occidentali (in particolare negli Stati Uniti) sia stata prolungata dai 25-30 anni ai 50-60 anni, rinvia la loro dismissione e costituisce un atout economico e competitivo ben significativo rispetto alla costruzione di nuovi impianti.

Del resto, è alquanto improprio parlare di uscita progressiva dal nucleare dei Paesi che detengono tale patrimonio e ben si guardano dal privarsene. Ne è prova la Svezia (46% di energia elettrica prodotta da 11 centrali nucleari) che, dopo un primo referendum abrogativo, ha chiuso una centrale (Barseback) nel 2000 e rinviato ogni ulteriore decisione «*per mancanza di alternative valide sul piano economico e ambientale*». La Svizzera ha da poco tempo bocciato un referendum teso a bloccare e a chiudere le sue cinque centrali nucleari. In Germania la decisione di limitare a 35 anni (in pratica fino al 2020) la vita utile degli impianti nucleari trova notevoli opposizioni ed è difficile pensare che tale Paese possa permettersi di rinunciare a una fonte che copre il 33% del fabbisogno elettrico nazionale. La Francia, con la conferma della sua scelta nucleare, registra il più basso e stabile costo del KWh in Europa e ha ridotto dal 1973 a oggi la sua dipendenza energetica dal 78 al 50% e le proprie emissioni di CO_2 del 30%, riuscendo a rientrare nei vincoli del protocollo di Kyoto.

L'Italia «uscita» dal nucleare a seguito dell'interpretazione «politica» di un referendum di venti anni fa, interpretato in modo restrittivo, è tuttavia tra i Paesi europei che utilizzano in modo consistente l'energia elettronucleare (18-20% del fabbisogno nazionale di energia elettrica fornita dalle centrali di Francia, Svizzera e Slovenia).

4. Incidenza delle varie fonti sulla produzione di energia. Confronti

Nella tabella III è riportata la produzione mondiale di energia primaria divisa per fonti con il loro contributio percentuale.

Tabella III

PRODUZIONE MONDIALE DI ENERGIA PRIMARIA E CONTRIBUTO PERCENTUALE DELLE VARIE FONTI (2004

Fonte	Energia prodotta (GW/anno)	Percentuale sul totale
Petrolio	5.700	38
Carbone	3.700	25
Gas naturale	3.500	23
Nucleare	925	6,25
Idroelettrico	925	6,25
Altre rinnovabili	250	1,5
Totale	**15.000**	**100**

Si vede che i combustibili fossili costituiscono circa l'85% del totale. Tenendo conto non solo dei problemi di sicurezza e ambientali, ma anche delle prospettive di approvvigionamento (40-50 anni per il petrolio, 50 e 200 rispettivamente per il gas e il carbone, al ritmo dei consumi attuali) è chiaro che, malgrado il predominio dei combustibili fossili (ancora per due o tre decenni all'incirca) la riduzione delle riserve e il conseguente aumento dei costi impongono la necessità di utilizzare fonti alternative. Ciò anche in relazione alle previsioni ormai realistiche di una crescita della popolazione mondiale di circa il 25% nei prossimi 20 anni (da 6 a 7,5 miliardi di abitanti) e di un corrispondente aumento dei consumi totali di energia (e delle concomitanti emissioni di CO_2) del 50%. Tali crescite riguarderanno soprattutto i Paesi in via di sviluppo, in particolare le cosiddette «*economie emergenti*», come ad esempio la Cina, l'India e alcuni Paesi del Sudamerica.

Ancora più significativa è la situazione relativa alla produzione di energia elettrica per due ragioni: perchè l'energia elettrica è un indice significativo del benessere e dello sviluppo sociale e perchè nella produzione di tale energia conta l'uso di fonti primarie e del loro impatto ambientale (per esempio le emissioni di CO_2).

Nella Tabella IV viene riportata tale produzione con il contributo percentuale delle varie fonti primarie e nella Fig. 15 le emissioni di CO_2 dai vari impianti di produzione a seconda delle fonti per ogni kWh.

Tabella IV
Produzione di energia elettrica e contributo percentuale delle varie fonti (anno 2004)

Fonte	Mondo		Europa		USA	
	GW/anno	%	GW/anno	%	GW/anno	%
Fossile	1.250	66	205	52	330	71
Nucleare	300	16	110	28	90	20
Idroelettrico	310	16	62	16	30	7
Altre rinnovabili	40	2	16	4	10	2
Totale	**1.800**	**100**	**393**	**100**	**160**	**100**

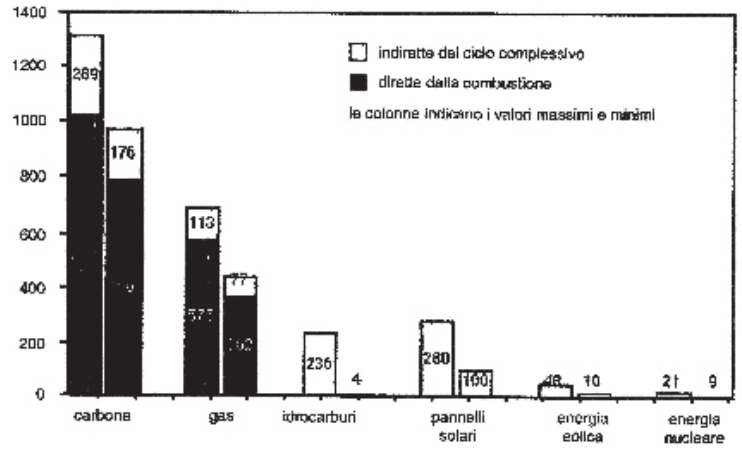


Figura 15 - Emissioni di gas serra dalla produzione di energia elettrica. Le 2 colonne per ogni fonte rappresentano i valori massimi e minimi.

È significativa e alquanto anomala la situazione italiana rispetto al mondo industrializzato. Come si vede dalla Tabella V (consumo per fonti di energia primaria) e VI (energia elettrica) noi non produciamo ma utilizziamo energia elettronucleare (importandola) e siamo il paese che più consuma (e importa) combustibili fossili ed usa più petrolio (olio combustibile) per produrre energia elettrica.

Tabella V
Consumo italiano d'energia primaria e contributo percentuale dalle varie fonti (anno 2004)

Fonte	Consumi (GW/anno)	Percentuale sul totale
Petrolio	117	44
Gas naturale	88	33
Carbone	23	9
Nucleare importato	13	5
Geotermia + RSU + altro	5	2
Totale fonti «non solari»	**246**	**93**
Idroelettrico	13	5
Legna da ardere e altre biomasse	<4	1,5
Eolico e solare diretto	<2	<0,5
Totale fonti «solari»	**<19**	7
Totale	**265**	**100**

Tabella VI Energia elettrica in Italia (anno 2004)		
Fonte	*Contributo (%)*	
	Produzione (32 GW/anno)	*Consumo (37 GW/anno)*
Fossile	81	70
Nucleare	zero	13
Geotermia + RSU	5	<4
Idroelettrico	14	13
Solare non-idro	1	<1

Confronto tra diverse fonti. Costi e impatto ambientale

Se si confrontano le varie fonti primarie tenendo conto di tutti i costi compresi quelli ambientali, si trova che il costo totale per un impianto che produce 1000 MWe (MegaWatt elettrici) è realisticamente di 1400-1500 $/kWe per il nucleare, con un'area occupata di 15 ettari, 1770 $/kWe per il carbone (area occupata 30 ettari) , 1500 per l'olio combustibile (20 ettari), 1200 per il gas naturale (12 ettari) mentre, escludendo gli impianti idroelettrici per le cosiddette *nuove energie rinnovabili* come il solare (fotovoltaico) e l'eolico, si hanno rispettivamente costi totali di impianto di 7.200 $ al kWe (area occupata 200 ettari) e 2.400 $ al kWe (12.500 ettari).

Tenendo conto inoltre dei costi di funzionamento e della effettiva disponibilità, si ottiene che il prezzo di kWe è di circa 3 centesimi di euro per il nucleare, 4 per il carbone, 7 per l'olio combustibile, 6 per il gas a ciclo combinato, 55 per il fotovoltaico e 11 per l'eolico.

Corrispondentemente le emissioni di CO2 nulle per il nucleare e le energie rinnovabili, ammontano a 7,5 Mtonn annue per il carbone, 6,2 per l'olio combustibile e 4,3 per il gas. Differenze notevoli si hanno anche per le emissioni di ossidi di zolfo e di azoto, comuni a tutti i combustibili fossili e assenti negli impianti nucleari , fotovoltaici ed eolici. Un dato interessante è il rapporto fra energia spesa ed energia ricavata: 1,7% per il nucleare, 5% per il carbone, 3% per l'olio combustibile, 3,8% per il gas mentre sale al 27% per il fotovoltaico e al 16,7% per l'eolico. Il che è correlato con il fatto che il *fattore di carico* (grosso modo la percentuale di utilizzazione) è del 90% per le centrali nucleari, a carbone, olio e gas, mentre è del 15% e del 30% rispettivamente per il fotovoltaico e l'eolico. In effetti, a fianco di un *sistema rinnovabile* va sempre previsto un metodo tradizionale di supporto e completamento, pena interruzioni impreviste e imprevedibili, con un aggravio ulteriore di costi.

Una questione altrettanto importante è, ovviamente, la relazione tra massa del combustibile e l'energia prodotta. In effetti, per ogni Kg di combustibile si ottiene:

1 Kg di legna:	1 kWh
1 Kg di carbone:	3 kWh
1 Kg di petrolio:	4 kWh
1 Kg di uranio:	50.000 kWh
(con riprocessamento):	3.500.000 kWh

(Il confronto non riguarda ovviamente fonti rinnovabili come il solare e l'eolico, che per natura sono inesauribili (alla scala umana).

Altro dato interessante è la disponibilità delle riserve energetiche che si misura in anni di possibile sfruttamento a costi economicamente affrontabili.

La Tabella VII mostra questi dati per le fonti non rinnovabili:

Tabella VII

Fonte	*Anni*
Petrolio	40
Gas	50
Carbone	200
Uranio	300
Uranio in Surgeneratori	20.000
Uranio e Torio in Surgeneratori	infinito

In effetti ciò che detterà l'evoluzione e il declino delle fonti primarie di energia sarà la loro convenienza economica, da una parte, e l'assestamento ragionevole dell'impatto ambientale dall'altra.

Nel primo caso giocherà soprattutto il costo di approvvigionamento del petrolio che trascina sempre il prezzo di tutti i prodotti energetici.

Esso pone seri problemi, anche se non tutti gli economisti sono d'accordo, di fronte alla realtà delle scorte mondiali – 2700 miliardi di barili, di cui già 1000 consumati – e senza contare il fatto che appare sempre più credibile *l'ipotesi di Hubbert* sulla curva della effettiva disponibilità del petrolio, la cosiddetta *curva critica*, il cui massimo (parità fra domanda e offerta) verrebbe a cadere fra non più di 10 anni, dopodichè la domanda supererebbe l'offerta.

Il confronto tra possibili nuove risorse e ritmo accelerato dei consumi appare negativo di fronte alla scomoda verità che l'80% del petrolio oggi prodotto proviene da giacimenti scoperti prima del 1973 e che la capacità produttiva della grande maggioranza dei giacimenti sta declinando. Vi è discussione su possibili nuove scoperte, anche se la tendenza dopo il massimo degli anni 60, è alla diminuzione.

Infine, occorre considerare che il fabbisogno tendenziale di petrolio è dettato ormai più che dai paesi industriali avanzati, dalla domanda che vanno esprimendo le vaste aree geopolitiche in via di sviluppo e si stima che crescerà del 60% entro il 2020.

Nel secondo è chiaro ormai che la *Questione Ambientale* entra nel gioco in modo

determinante. Del resto l'uomo ha sempre interferito con l'ambiente fin dalla *scoperta del fuoco* per ciò che riguarda, in particolare, la produzione di energia e via via con l'agricoltura, con l'estrazione e l'utilizzo del carbone fossile e poi del petrolio.

In questo contesto va vista anche la questione, più strettamente correlata con la produzione di energia, dell'«effetto serra» di origine antropica e delle (presunte) conseguenze, secondo visioni ormai diffuse, addirittura catastrofiche dal punto di vista climatico quali la teoria (che di «teoria» per ora si tratta) del «riscaldamento globale». Che il pianeta in cui viviamo subisca cambiamenti climatici anche notevoli legati a variazioni di temperatura di più di 5-6°C nei secoli e nei millenni della propria storia è, o dovrebbe essere, noto ed è ampiamente studiato. Restano le crescenti preoccupazioni che le attività umane possono essere una causa importante delle apparenti alterazioni del clima riscontrabili a livello planetario. Esse tuttavia si confrontano con notevoli incertezze, dovute alla flessibilità dei modelli computerizzati utilizzati per i possibili scenari e alla variabilità dei riscontri nelle misure di temperatura per esempio a terra, in aree urbane o con strumenti satellitari. Non vi è quindi accordo sul fatto che i gas-serra antropogenici siano il fattore dominante.

Le misure proposte al fine di «rimediare» e «prevenire» tale ipotetico rischio sono, come noto, riassunte nel Protocollo di Kyoto. Tale Protocollo, inteso come Patto Planetario e costruito sulla base del cosiddetto Principio di Precauzione preso alla lettera, senza una più approfondita analisi del rapporto costi/benefici, sancisce le restrizioni e gli interventi che i vari paesi si obbligano a rispettare per ricondurre il tasso annuale di emissioni entro il 2012 (più precisamente tra il 2008 e il 2012) a un pò meno del 95% del livello complessivo del 1990. In ogni caso, comunque lo si giudichi, il Protocollo di Kyoto, anche se interamente applicato, avrebbe risultati poco significativi, visto che la richiesta riduzione della CO_2 (che, tra l'altro, non è il principale gas serra, tenuto conto del vapor d'acqua e del metano, ad esempio) avrebbe l'effetto di spostare solo di qualche anno (e di qualche punto percentuale) l'entità del riscaldamento globale, qualunque ne sia l'origine, eventualmente prevista per il 2100.

L'Europa è all'avanguardia nel propugnare il Protocollo di Kyoto. Tuttavia lo zelo europeo non è confortato da politiche virtuose, visto che solo 4 paesi (Germania, Svezia, Regno Unito e Francia) sembrano in grado di arrivare a rispettare tali limiti, mentre per il resto, Italia compresa, si è già abbondantemente al di sopra (mediamente più del 7-8%) (vedi fig. 16).

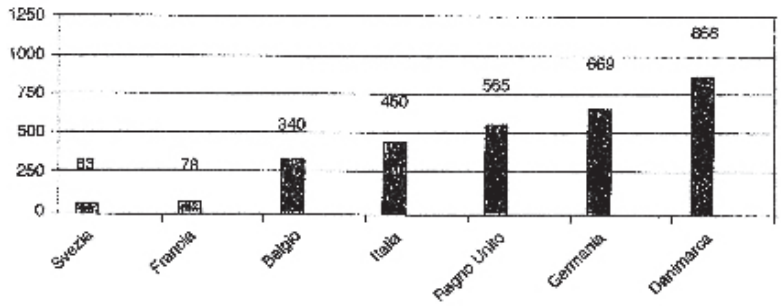


Figura 16 - Emissioni di CO_2 in tonn/kW in vari Paesi europei.

Non è strano che tra i paesi più virtuosi vi siano quelli che usano in modo consistente l'energia nucleare (vedi Svezia e Francia rispetto per esempio alla Danimarca) l'unica fonte *su larga scala*, esente da emissioni. Sarà pertanto problematico il raggiungimento dell'obiettivo del 5,8% per l'Unione Europea.

Quali sono dunque le possibili vie da intraprendere? Secondo il Consiglio Mondiale dell'Energia: «*Tutte le nazioni industrializzate si rendono conto che la diversificazione dei combustibili nella produzione di energia elettrica significa semplicemente che si dovranno usare più carbone e più nucleare e che nessuna fonte dovrà essere trascurata per arbitrarie ragioni politiche*».

È questo il motivo strategico di fondo per cui occorrerà considerare, scientificamente oltrechè economicamente, tutte le fonti energetiche disponibili e potenziali, senza discriminazione o emarginazione di alcuna, tramite un confronto oggettivo dei costi e dei benefici corrispondenti.

E veniamo al punto. Per far fronte ai fabbisogni energetici di tutta la società umana, sempre più legati all'evoluzione dei paesi in via di sviluppo, si dovrà prendere in conto ogni possibile soluzione derivante da una lista completa delle sorgenti di energia che l'umanità potrà spillare *a una scala significativa* durante il secolo.

Appendice. Digressioni su possibilità future

Si è accennato, come altra possibilità di sfruttare l'energia nucleare, alla FUSIONE. Come si è visto, il principio della *fusione nucleare* è opposto alla *fissione* e consiste nel processo di sintesi di due *nuclei leggeri* (per esempio Deuterio e Trizio) per formarne uno più pesante (tipicamente Elio) liberando energia. Tali sono le *reazioni termonucleari* che avvengono nel sole a temperature elevatissime (decine di milioni di gradi) che ne fanno una fornace (dal cui calore dipende la vita sulla terra) che, tra l'altro, dopo qualche altro miliardo di anni, si spegnerà quando tutto l'idrogeno sarà bruciato e trasformato in Elio.

Per avere un'idea di quanta energia si potrebbe liberare si pensi che «*bruciando*» un Kg di deuterio di ottiene un'energia equivalente a 100 milioni di volte quella ottenibile (chimicamente) da 1 Kg di carbone o petrolio. D'altra parte, 1 Kg di uranio corrisponde a circa 20 milioni di Kg di petrolio.

È chiaro quindi l'interesse (e la speranza) per arrivare a sfruttare questa fonte di energia che sarebbe del resto *inesauribile* (il deuterio si trova in abbondanza in natura e il trizio si ottiene dal Litio pure abbondante) e con minori problemi relativi alla sicurezza e alle scorie radioattive. Tuttavia, per produrre in laboratorio un simile processo, e quindi dimostrare la *fattibilità* di un *reattore a fusione* , occorrono condizioni estreme di temperatura e di pressione perchè una miscela di nuclei leggeri (*plasma*) opportunamente *confinati* possono avvicinarsi superando la *repulsione* dovuta alla loro carica elettrica positiva, in modo da fondersi e liberare energia *controllabile* (come avviene per la fissione), il che costituisce però ancora una barriera cui ci si è man mano avvicinati senza però superarla.

Ciò peraltro avviene ma in *modo rapido ed esplosivo* nella bomba termonucleare (bomba H).

La fusione nucleare può avvenire in diversi modi. Due sono gli approcci più significativi: il «*confinamento magnetico*» e il «*confinamento inerziale*». Nel primo caso (il più classico e il più noto) il plasma di deuterio e trizio viene confinato entro un «*Tokamak*» (anello toroidale sede di un intenso campo magnetico) ad altissima temperatura (10-20 milioni di gradi) per tempi sufficientemente lunghi (dell'ordine del secondo, vedi fig. 17).

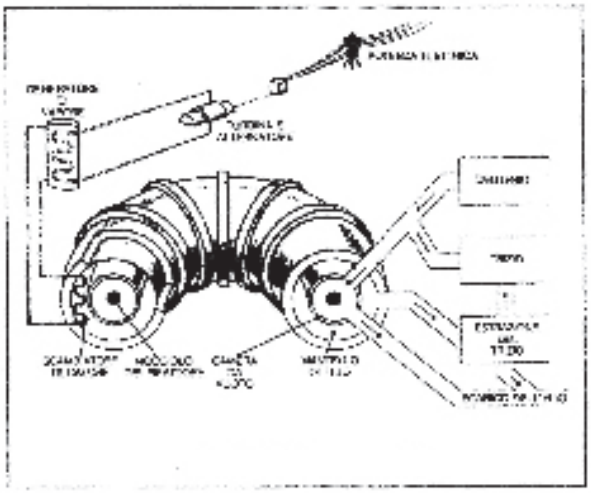


Figura 17 - Schema ideale di un reattore a fusione.

Dopo una serie di esperimenti culminati con il reattore sperimentale europeo JET (Joint European Torus) a Culham (Inghilterra), con la prima dimostrazione di innesco della reazione D+T , anche se non continua, gli sforzi internazionali si sono concentrati nella realizzazione del reattore ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) che verrà installato a Caradache (Francia) e che dovrebbe dimostrare la fattibilità ingegneristica di un reattore di potenza propedeutico al possibile sfruttamento dell'energia di fusione.

Il metodo di confinamento inerziale consiste nel fare *implodere* bersagli adeguati di deuterio e trizio (o deuterio e deuterio) e cioè *microcapsule* («pellets») bombardate da

radiazioni elettromagnetiche (per esempio fasci laser di grande potenza) o da fasci di ioni accelerati che producono raggi X, al fine di comprimerle a grandissime pressioni (circa 1000 volte quella di un liquido) fino a dar luogo a microesplosioni termonucleari.

La fisica di tale processo è disgiunta dall'ingegneria del reattore e quindi sarebbe di più facile investigazione. Tuttavia vi sono stati e vi sono tuttora, anche se molti dati sono stati ormai resi noti, problemi di segretezza dovuti ad aspetti tecnici d'interesse militare.

Comunque non appare realistico fare assegnamento sulla fusione nucleare per far fronte, almeno per buona parte di questo secolo, alla necessità di sostituzione dei combustibili fossili.

Possibilità tecnologiche future dell'energia nucleare da fissione sono invece i REATTORI VELOCI e i REATTORI SOTTOCRITICI.

I *reattori veloci* utilizzano neutroni veloci che mantengono la loro velocità, ca. 20.000 Km/sec.) senza essere rallentati come avviene invece nelle normali centrali nucleari già descritte. Questi neutroni vengono assorbiti dall'uranio naturale che si trasforma in plutonio 239, che è *fissile* e quindi capace di scindersi e avviare la reazione a catena.

In altre porole nel reattore si produce «*nuovo combustibile*» . Per questo motivo questi reattori vengono detti *autofertilizzanti*. Ve ne sono in fase sperimentale in vari paesi, come la Francia, il Giappone, la Russia e gli Stati Uniti, anche se per ora, trattandosi di reattori sperimentali, non risultano economicamente convenienti e con qualche problema tecnico e di sicurezza. Il loro sviluppo è ovviamente rallentato dalla concorrenza dei reattori convenzionali (a neutroni termici) e dall'attuale grande disponibilità di plutonio proveniente dallo smantellamento degli arsenali militari russi e americani.

Osserviamo che, come a suo tempo proposto da Edoardo Amaldi e Mario Silvestri, l'unico modo per eliminare le testate nucleari è quello di bruciarle come prezioso combustibile nelle centrali per la produzione di energia.

I *reattori sottocritici* sono sistemi «*ibridi*», costituiti da un insieme *acceleratore di particelle-reattore a fissione* (*Accelerator Driven System ADS)*, come per esempio propugnato da Carlo Rubbia. Si tratta di accelerare protoni (con un apposito acceleratore di particelle) a circa 1000 MeV, che vengono fatti incidere su piombo (o bismuto) liquido nel quale si generano neutroni veloci che possono essere iniettati in una struttura moltiplicante *sottocritica* (cioè sotto la soglia di criticità della fissione nucleare), dove possono *fertilizzare* bersagli di uranio e torio naturale tarsformandoli in materiali fissili che avviano la reazione a catena. Questi sistemi sono interessanti perchè possono distruggere nuclidi ad altissima radioattività e servire quindi come «inceneritori di scorie radioattive».

Va aggiunto inoltre che, per quel che riguarda i reattori a fissione, vi è ormai una notevole attività per la progettazione e costruzione di reattori di *nuova generazione*. Ne fanno parte il reattore EPR (European Pressurized Reactor) da 1600 MW già in fase di installazione con due prototipi in Finlandia e in Francia ed altri tipi di reattori

americani (terza generazione), nonchè i reattori di quarta generazione. Questi ultimi fanno parte di un'iniziativa (*Generation IV International Forum GIF*) avviata nel gennaio 2000 da un Consorzio Internazionale per la costruzione di sistemi termici ad acqua che dovranno assicurare: a) il più elevato livello di sicurezza, sia per incidenti tecnico-operativi che per atti di terrorismo; b) massima riduzione dei residui radioattivi; c) maggior sfruttamento dei materiali fissili e fertili; d) capacità di produrre direttamente idrogeno per scissione termica.

E concludiamo appunto con due parole sull'idrogeno.

L'idrogeno *molecolare* è un ottimo combustibile, non è tossico, non inquina bruciando e, combinato elettrochimicamente in una cella combustibile, produce elettricità con la sola emissione di vapore acqueo. Purtroppo esso non esiste sulla terra e bisogna produrlo da composti che contengono idrogeno (per esempio l'acqua mediante elettrolisi). La produzione deve naturalmente procedere attraverso una tecnologia che non introduca gli stessi inquinanti che vogliamo evitare, per esempio non possono essere utilizzate energie primarie come i combustibili fossili nè processi di estrazione come quelli che utilizzano il metano (CH_4) che, interagendo con acqua, produce idrogeno e anidride carbonica.

Restano i processi in cui l'energia primaria proviene dal solare, dall'eolico o dal nucleare. Tuttavia i processi per via *elettrolitica* (elettrolisi dell'acqua) richiedono un' energia maggiore di quella che si ottiene alla fine e pertanto sono solo giustificati per la produzione di carburante non inquinante. Il modo migliore per la produzione di idrogeno è quello di utilizzare centrali nucleari ad alta potenza in modo da ottenere sufficiente calore per scindere, per via termica, la molecola d'acqua in idrogeno e ossigeno.

In ogni caso l'idrogeno *non è una fonte di energia* ma un *vettore energetico* conveniente per altri motivi (trasporti) solo se si riesce a produrlo a basso costo (ovvero dal nucleare).

Infine occorre tener presente, a parte non facili problemi di immagazzinamento (ad alta pressione) e di trasporto (l'idrogeno è un gas altamente infiammabile) che a) per produrre un m^3 di idrogeno per via elettrolitica si avrebbe un costo del 30% superiore a quello del metano; b) l'idrogeno ha un potere calorifico pari a un terzo di quello del metano; c) l'energia necessaria per produrre idrogeno per via elettrolitica è 1,5 volte quella che si può ottenere dalla sua combustione.

Note

[*] Il testo corrisponde alla conferenza tenuta a Firenze, nell'ambito di Pianeta Galileo, il 27 ottobre 2006, presso l'Auditorium del Consiglio regionale della Toscana.

[1] I prefissi usati indicano i seguenti multipli: K (Kilo) = 1.000 = 10^3, M (Mega) = 1.000.000 = 10^6, G (Giga) = 1 Miliardo = 10^9.

[2] Ovviamente, l'uso del carbon fossile (così come poi con il petrolio e il gas) aggiunge nuove possibilità di inquinamento: zolfo e catrami liberati nella combustione sotto forma di fumi e anidride solforosa, oltre all'anidride carbonica, gas non inquinante ma tra gli artefici dell'effetto serra. Reazioni sociali comunque non si fecero attendere, anche violente seppure inefficaci. Nel Settecento, a Londra, furono emessi editti per proibire l'uso industriale del carbone, pena la morte. E tuttavia il consumo dei carbone crebbe esponenzialmente (v. curva logistica di fig. 5), sostituendo progressivamente la legna. La società del resto funziona come un grande sistema autoregolantesi, che procede per azioni e reazioni cercando di compensare gli eccessi con circuiti di controllo: l'animismo delle antiche religioni che ammoniva a non tagliare gli alberi abitati dagli spiriti; l'avvento di leggi e tecnologie di controllo con il *cristianesimo* e il *rinascimento.* In Inghilterra l'aumento del consumo di carbone non peggiorò la situazione grazie a migliori tecniche di combustione, scelta dei carboni e uso di alti camini.

La bomba e la proliferazione nucleare

Roberto Fieschi

Dipartimento di Fisica, Università di Parma
Consiglio Scientifico USPID (Unione Scienziati Per Il Disarmo)

Francesco Lenci

CNR Istituto Biofisica, Pisa
Consiglio Scientifico USPID (Unione Scienziati Per Il Disarmo)

1. Alle soglie dell'era atomica

Con la scoperta della fissione dell'uranio[1], fatta in Germania nel 1938 da Otto Hahn e Fritz Strassmann nel corso di studi a carattere fondamentale sulla struttura del nucleo atomico, ad alcuni fisici (Fermi, Joliot, Heisenberg) fu chiaro che, se si fosse potuto realizzare un processo (la reazione a catena) che sfruttasse tale fenomeno, si sarebbe potuta liberare una quantità di energia fino ad allora inimmaginabile.

Questa scoperta metteva dunque alla portata di qualunque Stato tecnologicamente sviluppato gli elementi necessari alla costruzione di un'arma senza precedenti. In questo l'arma atomica si differenzia da tutte le altre inventate e costruite in precedenza dall'uomo: idea e progetto sono sorti nella mente di alcuni scienziati, in assenza di sollecitazioni delle autorità civili o militari.

Gli eventi successivi a quel 1938 dimostrano quanto questo sia vero: oggi nove stati posseggono le armi nucleari (Stati Uniti, Russia, Gran Bretagna, Francia, Cina, Israele, India, Pakistan e Corea del Nord) e forse un decimo, l'Iran, si prepara a costruirsele violando il Trattato di Non Proliferazione (NPT).



Figura 1 – Otto Hahn (1879-1968).



Figura 2 – Albert Einstein (1879-1955).

2. Un passo indietro

Paradossalmente, un aiuto essenziale alla costruzione delle prime bombe atomiche

americane venne proprio da Adolf Hitler. Il Cancelliere del Terzo Reich, poco dopo di aver raggiunto il potere (1933), avviò la sua campagna razziale, come anticipato nella sua famosa opera *Mein Kampf*.



Figura 3 – Adolf Hitler (1889-1945) al potere. Molti tra i migliori fisici tedeschi lasciano la Germania.



Figura 4 - Anche Fermi emigra con la famiglia per le leggi razziali.

Inizia in Germania la persecuzione antisemita. Nel 1935, con le leggi di Norimberga, gli ebrei sono privati della cittadinanza tedesca.

Molti ebrei lasciarono la Germania nazista e fra questi molti brillanti fisici che in seguito ebbero un ruolo importante nello sviluppo dei nuovi ordigni: Lise Meitner (collaboratrice di Hahn) e Otto Frisch, che interpretarono il fenomeno della fissione e valutarono l'energia che si liberava, Rudolf Peierls e Klaus Fuchs, che in Gran Bretagna svilupparono il primo modello di bomba atomica (Fuchs in seguito passerà informazioni all'Unione Sovietica), i due fisici ungheresi Leo Szilard, Edward Teller, il matematico ungherese Johann von Neumann, Hans Bethe, e Albert Einstein. Dall'Italia fascista fuggì Enrico Fermi. Senza il loro contributo difficilmente la bomba atomica sarebbe stata realizzata prima della fine della guerra.



Figura 5 – La notte dei cristalli, nella quale si scatenò la caccia agli ebrei (1938).

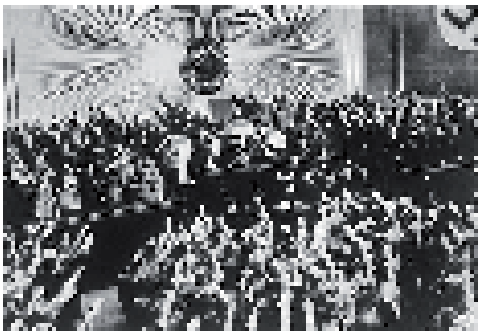


Figura 6 – Norimberga: raduno nazista in occasione dell'Anschluss dell'Austria.

3. Verso la guerra

Nel 1938 hanno luogo l'annessione dell'Austria e l'invasione e la spartizione della Cecoslovacchia, in seguito allo sciagurato Patto di Monaco. La politica espansiva e aggressiv a di Hitler non lascia più illusioni né alle democrazie occidentali né all'Unione

Sovietica.



Figura 7 – Trattato di Monaco (1938), incontro fra Hitler e Chamberlain, primo ministro britannico: aprirà la strada all'invasione e allo smembramento della Cecoslovacchia.



Figura 8 - 1939, marzo: invasione della Cecoslovacchia.

L'anno seguente il Patto d'Acciaio rafforza l'alleanza fra la Germania nazista e l'Italia fascista, e con il Patto Ribbentrop–Molotov per la spartizione della Polonia fra la Germania e l'Unione Sovietica, si va rapidamente verso la seconda Guerra mondiale (1 settembre 1939).



Figura 9 - 1939, maggio: Patto d'acciaio fra la Germania nazista e l'Italia fascista.



Figura 10 – Patto Ribbentrov-Molotov (1939) sulla spartizione della Polonia, che porta alla Guerra mondiale.

4. Intanto i fisici …

Entro pochi mesi dall'annuncio della fissione e dall'interpretazione della Meitner e di Frisch due gruppi di fisici - Enrico Fermi, Szilard e Zinn in America, e Joliot in Francia - dimostrarono che nella fissione dell'uranio si liberavano più di due neutroni, che in linea di principio si poteva realizzare la reazione a catena, e che quindi era possibile sfruttare l'energia nucleare per scopi bellici. Allo stesso risultato giunsero, nello stesso periodo, il fisico tedesco Werner Heisenberg e due allievi di Igor Kurchatov, che in seguito sarebbe diventato il responsabile dei progetti nucleari sovietici.

Nessuno poteva dubitare che se i fisici tedeschi fossero riusciti per primi nell'intento, Hitler non avrebbe avuto remore di alcun tipo nell'utilizzare la bomba atomica[2]. Ma le ricerche, in Gran Bretagna e negli Stati Uniti, procedevano a un ritmo lento, mancando i fondi e il coordinamento per un progetto di grandi dimensioni.

Tanta era la preoccupazione per l'uso che di queste conoscenze poteva essere fatto per costruire nuove armi, che alcuni fisici, tra i quali L. Szilard, P. A. M. Dirac e V. Weisskopf invitarono addirittura la comunità scientifica internazionale a una sorta di autocensura (non pubblicare i risultati ottenuti per non permettere agli scienziati che lavorano nella Germania di Hitler di venire in possesso di nuove informazioni), invito che non venne però raccolto.

Le rapide vittorie degli eserciti tedeschi nei primi due anni di guerra – sconfitta della Polonia e della Francia, occupazione di Olanda, Danimarca e Norvegia – accentuarono le preoccupazioni degli stati democratici e dell'Unione Sovietica (che nel 1941 sarà invasa dalla Germania).

Gli eventi evolvevano precipitosamente, la Germania aveva bloccato le vendite di uranio e le ricerche necessitavano di ingenti finanziamenti, non certo facili da ottenere, per procedere più speditamente. Einstein in persona, su suggerimento di Szilard e di Wigner, indirizzò al presidente Roosevelt la famosa lettera in cui si chiedeva che il governo intraprendesse una rapida azione per il controllo della situazione, affidando a una persona di fiducia il compito di tenere in contatto gli ambienti amministrativi con la comunità scientifica e di ottenere i fondi necessari per la continuazione dei lavori, ormai troppo gravosi per i laboratori universitari dai quali erano partiti.

5. Il Progetto Manhattan

L'attacco giapponese a Pearl Harbor (7 dicembre 1941) avrebbe potuto rafforzare il proposito di muoversi con decisione, ma ancora per un anno le cose procedettero lentamente.

Il 2 dicembre 1941 il gruppo di Fermi al Metallurgical Laboratory (Met Lab) di Chicago realizzò la prima reazione nucleare a catena controllata (pila di Fermi). Servirà per progettare i reattori nucleari che produrranno il plutonio[3] che verrà impiegato nell'esperimento di Alamogordo e nella bomba sganciata su Nagasaki.

Nel 1942 l'organizzazione delle ricerche passò sotto il diretto controllo dell'Esercito; Leslie R. Groves, generale del Genio, ne fu nominato responsabile ed ebbe inizio il «Progetto Manhattan»; con il nuovo anno furono avviati i lavori per il nuovo centro che avrebbe realizzato la bomba a Los Alamos, nel New Mexico, e Robert Oppenheimer ne fu nominato direttore.



Figura 11 - 1942, 2 dicembre: Pila di Fermi, reazione a catena controllata (200 watt).



Figura 12 - Robert Oppenheimer (1904-1967), direttore scientifico del Progetto Manhattan.

Il primo progetto per realizzare la bomba atomica, come si è visto, è partito come reazione alla supposta possibilità che la Germania nazista costruisse questo ordigno terribile di distruzione indiscriminata. Processi analoghi di azione – reazione saranno responsabili di altre «proliferazioni» nel dopoguerra. Ma si vedrà anche che, successivamente, la comprensibile reazione a un supposto pericolo non è stato l'unico meccanismo che ha portato alla proliferazione nucleare.

6. La sconfitta della Germania – il progetto procede a ritmi frenetici

All'inizio del 1944 il servizio di spionaggio britannico giunse alla conclusione che le ricerche tedesche sulla bomba atomica non destavano preoccupazioni. La situazione militare in Europa era ormai tale che il pericolo di una bomba atomica tedesca era cessato, e addirittura si poteva prevedere che la resa della Germania sarebbe giunta prima della disponibilità delle bombe che venivano preparate a Los Alamos. Ciononostante, il progetto Manhattan per realizzare la «bomba atomica» proseguì a ritmo frenetico.



Figura 13 - 8 maggio 1945 : resa della Germania – si scoprono i campi di sterminio.

Nel frattempo, però, stavano mutando gli obiettivi americani: nel 1943 si cominciò a pensare all'impiego della bomba atomica contro il Giappone. D'altra parte, man mano che si profilava la sconfitta nazista, incominciavano ad emergere i contrasti di interesse fra gli alleati occidentali e l'Unione Sovietica, e anche, in misura più limitata, fra Stati Uniti e Gran Bretagna. In questo nuovo contesto la bomba assumeva anche il valore di strumento politico nelle mani del governo americano.

Ormai l'obiettivo di controllare nel futuro l'energia nucleare e le armi atomiche era diventato altrettanto importante della realizzazione delle bombe prima della fine della guerra. Interessante a questo proposito la dichiarazione rilasciata dal generale Groves nel 1954: «Credo importante dichiarare che, dopo circa due settimane dal momento in cui mi fu affidato il progetto, già non mi facevo più alcuna illusione che il nemico non fosse la Russia e che il progetto non fosse portato avanti su queste basi. Naturalmente il presidente ne fu informato.»

Individuiamo qui il secondo obiettivo alla base della proliferazione nucleare, accanto a quello della difesa tramite la dissuasione: *l'arma nucleare come strumento della politica estera.*

7. Gli scienziati contro l'uso della bomba

Dissoltosi l'incubo di un'arma nucleare hitleriana, si diffuse fra molti degli scienziati che lavoravano al progetto Manhattan uno stato d'animo del tutto opposto a quello che li aveva guidati fino ad allora. Leo Szilard scrisse più tardi: «Nel 1945, quando cessammo di preoccuparci di quello che i tedeschi ci avrebbero potuto fare, incominciammo a domandarci con apprensione che cosa il governo degli Stati Uniti avrebbe potuto fare ad altri paesi.» Quasi nessuno però ebbe la forza morale di chiedere l'arresto immediato della fabbricazione dell'arma, e solo uno, Joseph Rotblat, decise di abbandonare il progetto Manhattan (dicembre del 1944). Joseph Rotblat era un giovane e brillante fisico polacco che era andato a Los Alamos dall'Inghilterra, dove lavorava sotto la guida di Chadwick, un maestro che già nella primavera del 1941 era arrivato alla conclusione che la possibilità di costruire una bomba nucleare era una tragica sconvolgente realtà.

Nel 1985, in occasione del 40° anniversario del bombardamento atomico di Hiroshima e Nagasaki, Rotblat rilasciò una dichiarazione al *Bulletin of the Atomic Scientists* (una rivista fondata nel 1945, dopo il tragico uso delle armi nucleari contro le popolazioni di Hiroshima e Nagasaki, per informare i governi e l'opinione pubblica del bisogno urgente di arrestare la diffusione delle armi nucleari). Quella dichiarazione è ancora oggi un monito e un esempio, certo non soltanto per gli uomini di scienza:

> Dopo quaranta anni una domanda continua a tormentarmi: abbiamo imparato abbastanza per non ripetere gli errori che commettemmo allora? Io non sono sicuro nemmeno di me stesso. Non essendo un pacifista perfetto, io non posso garantire che in una situazione analoga non mi comporterei nello stesso modo. I nostri concetti di moralità sembra vengano abbandonati una volta che una iniziativa militare è stata avviata. È, quindi, della massima importanza non permettere che si creino tali situazioni. Il nostro sforzo principale deve essere concentrato sulla prevenzione della guerra nucleare, poiché in una tale guerra non soltanto la moralità, ma l'intera struttura della civiltà scomparirebbe.

Tra i fondatori delle Conferenze Pugwash, delle quali è stato instancabile Segretario e Presidente fino alla sua morte (30 Agosto 2005), nel 1995 Joseph Rotblat ed il Movimento Pugwash furono insigniti del Premio Nobel per la Pace.



Figura 14 - Joseph Rotblatt: il coraggioso dissidente.



Figura 15 - Niels Bohr (1885-1962).

Molti scienziati chiesero che la bomba non fosse impiegata contro le città del Giappone, ma non furono ascoltati. Fin dall'agosto 1944 Niels Bohr, il grande fisico danese, aveva presentato al presidente Roosevelt un memorandum per metterlo in guardia contro «la terrificante prospettiva di una competizione futura fra gli Stati per un'arma così formidabile.» La sola speranza di evitare la corsa agli armamenti nucleari nel dopoguerra era, secondo Bohr, di raggiungere un accordo con l'Unione Sovietica sul futuro controllo dell'energia atomica prima che la guerra finisse e che la bomba venisse sperimentata. Solo così, attraverso la creazione della bomba, la scienza avrebbe potuto contribuire a dare nel futuro un fondamento solido alla pace.

La storia della corsa agli armamenti nucleari nel dopo guerra ha confermato le fosche previsioni di Bohr. Da un punto di vista più cinico ha dato ragione anche a gli Stati Uniti: imponendo un costosissimo riarmo all'URSS, la corsa agli armamenti ha contribuito allo sfacelo economico e al crollo del regime sovietico.

8. Il test di Alamogordo: 'Trinity'

Con la fine dell'anno la realizzazione concreta delle bombe si avvicinava; si prevedeva che due bombe fossero pronte per il 1° agosto 1945. Le istruzioni per allestire gli aerei che avrebbero dovuto lanciarle sul Giappone e per addestrare gli equipaggi erano state date. Nessuno, a livello politico o militare, dubitava ormai della necessità di usarle in qualche modo prima della fine della guerra, se si fossero rese disponibili.

Il 16 luglio 1945 gli scienziati ebbero modo di constatare quanto la loro arma fosse potente con il test di Alamogordo in cui fu fatta esplodere una bomba al plutonio, come quella che poi sarà sganciata su Nagasaki (quella di Hiroshima era basata sulla fissione dell'uranio 235). L'energia generata fu stimata equivalente a quella di un'esplosione di quindicimila-ventimila tonnellate di tritolo.

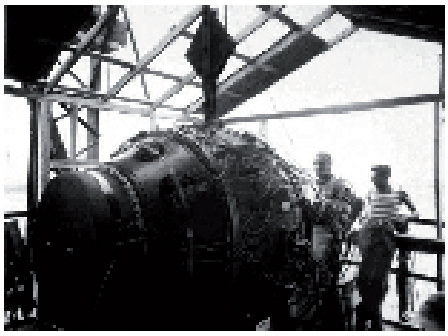


Figura 16 - 1945, 16 luglio: esperimento Trinity, esplosione della bomba al plutonio.

Quando le notizie sull'esito positivo dell'esperimento lo raggiunsero alla Conferenza di Potsdam dei 'tre grandi' (17 luglio - 2 agosto), il presidente Truman apparve visibilmente esultante. Il ministro della guerra H.L. Stimson notò che Truman «era enormemente rallegrato dalla notizia e quando ci vedevamo non faceva altro che parlarmene. Diceva che gli aveva dato un senso di sicurezza completamente nuovo.» Il giorno dopo aver ricevuto il rapporto completo della prova, Truman cambiò il modo di condurre i negoziati con Stalin. Secondo Churchill, il presidente «arrivò alla riunione dopo aver letto il rapporto e sembrava un altro uomo.» Fu drastico a imporre dei limiti agli interventi dei sovietici e, in generale, dominò da padrone l'intera riunione.

Dunque, l'esperimento di Alamogordo, il coronamento dell'intenso sforzo condotto per tre anni dagli scienziati e dai tecnici del progetto Manhattan, fu anche il primo atto della diplomazia nucleare. Meno di due settimane più tardi, il 6 agosto a Hiroshima, si sarebbe passati dalla diplomazia incruenta all'azione diretta.

9. Hiroshima e Nagasaki

All'isola di Tinian, *Little Boy*, la bomba all'uranio, era pronta il 31 luglio. Gli equipaggi dei B-29 avevano già compiuto varie esercitazioni e si attendevano solo le previsioni meteorologiche. Prima della partenza, la notte fra il 5 e il 6 agosto, un cappellano protestante pronunciò davanti all'equipaggio prescelto una breve preghiera d'invocazione al Padre Onnipotente.



Figura 17 - L'aereo B-29 Enola Gay, che sganciò la bomba su Hiroshima.



Figura 18 - Copia di Little Boy, la bomba all'uranio sganciata su Hiroshima.

Alle 7.30 del giorno 6 agosto l'aereo comandato da Tibbets, giunto in prossimità

di Hiroshima prese quota per ridurre l'impatto con l'onda d'urto. *Little Boy* esplose a un'altezza di seicento metri sopra la città poco dopo le 8 (ora di Hiroshima). La potenza della bomba di Hiroshima, che era equivalente a quella di circa 13.000 tonnellate di tritolo, uccise circa 68.000 persone e ne ferì circa 76.000.



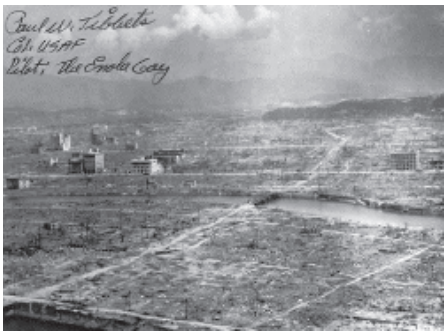


Figure 19 e 20 - Hiroshima distrutta.

Fat Man, la bomba al plutonio, avrebbe dovuto essere pronta per l'11, ma i lavori furono accelerati in modo da essere pronti per il 9, giorno in cui si prevedeva tempo buono. L'obiettivo prescelto, Kokura, era poco visibile a causa di nuvole basse, quindi il B-29 proseguì per Nagasaki, dove la bomba fu sganciata ed esplose, con una potenza di ventidue kilotoni, alle 11 del mattino. Uccise circa 38.000 persone e ne ferì circa 21.000. Sul perché di questo anticipo, che comportò fasi di frenetica attività per la messa a punto della bomba, pesano ancora oggi molti interrogativi, e una delle ipotesi più agghiaccianti è che, se il Giappone si fosse arreso, la bomba non avrebbe potuto essere sganciata.



Figura 21 - Copia di Fat Man, la bomba al plutonio sganciata su Nagasaki.

Il 10 agosto il Giappone offrì di arrendersi alla condizione che l'autorità dell'Imperatore non fosse messa in discussione. Il 13 un grande *raid* aereo rovesciò sul Giappone cinquemila tonnellate di bombe esplosive e incendiarie. Nella notte fra il 13 e il 14 l'Imperatore accettò le condizioni di resa e lo comunicò al suo popolo il 15 agosto: «Inoltre il nemico ha incominciato ad usare una bomba nuova e crudele, la cui potenza distruttiva è incalcolabile.», disse Hirohito nel suo proclama.

Dai documenti recenti risulta che il Giappone probabilmente si sarebbe arreso anche se le bombe atomiche non fossero state impiegate. Certamente fu del tutto inutile la seconda.

Dopo la fine della guerra William Pollard, che aveva collaborato al progetto Manhattan e che in seguito era diventato vescovo, disse:

> Hiroshima sta diventando un mito profondamente immerso nella psiche di tutti i popoli della Terra [...] Nella *dimensione sacra* i fatti storici gradualmente assumono la stabilità del mito, mentre nella *dimensione profana* essi perdono gradualmente la loro presa sulla gente e diventano semplicemente materia per gli storici. Questo è il destino di Hiroshima: trasformarsi in un mito universale profondamente affondato nel tempo sacro di tutti i popoli della Terra; il simbolo della loro convinzione che non si deve permettere una guerra nucleare.

Nel 1950 Blackett scrisse lucidamente:

> Dobbiamo dunque concluderne che il lancio delle bombe atomiche, piuttosto che l'ultima azione militare della seconda guerra mondiale, è stato in realtà la prima grande operazione della guerra fredda diplomatica contro la Russia (..). [Gli scienziati atomici] compresero che il loro lavoro era stato sfruttato per architettare una vittoria diplomatica, in previsione di una politica di potenza nel mondo nell'immediato dopoguerra, e non per risparmiare vite americane; questa rivelazione risultò per molti troppo sgradevole per venir coscientemente ammessa[4].

10. La bomba sovietica

Come molti scienziati avevano previsto, la bomba segnò solo l'inizio di una corsa sempre più folle al riarmo; gli impianti per la separazione degli isotopi e per la produzione del plutonio continuarono a marciare a pieno ritmo, ma il monopolio nucleare che i militari e i politici, sordi alle ammonizioni di molti scienziati, credevano di poter conservare per parecchi anni, decenni forse, pur in mancanza di un accordo internazionale, fu perso nel 1949.

Nei paesi occidentali questo processo fu validamente sostenuto dal 'complesso militare-industriale', la cui nefasta azione era stata denunciata da Dwight Eisenhower già nel 1961. John Kenneth Galbraith osservò, nel 1967: «Per sua natura una competizione imperniata sulla tecnologia non si conclude mai. In una competizione tecnologica l'obsolescenza è un sostituto quasi perfetto del logorio causato da una guerra combattuta.»

Nell'URSS, in risposta alle informazioni sugli sviluppi delle ricerche in USA e in Germania, era iniziato nel febbraio 1943 un programma sulla possibilità di costruire l'arma atomica, ma su basi modeste, anche a causa delle distruzioni belliche e dell'occupazione tedesca.

Dopo Hiroshima, Stalin chiamò a raccolta i suoi scienziati e avviò un intenso programma per realizzare al più presto la bomba atomica; l'Unione Sovietica sperimentò la sua prima bomba (al plutonio) nell'agosto 1949; il primo esperimento di una bomba all'U-235 avrà luogo nel 1951 e alcuni anni più tardi le forze armate sovietiche saranno dotate di armi nucleari.

È questo il primo esempio di proliferazione nucleare dovuto al meccanismo

perverso di azione-reazione. Si tratta, in questo caso, di *proliferazione orizzontale,* intendendo l'estensione del possesso di armi nucleari da parte di stati che ne erano prima sprovvisti.

11. La guerra fredda e la corsa agli armamenti[5]

È del marzo 1946 il discorso di Winston Churchill a Fulton; per la prima volta venne usata pubblicamente l'espressione 'cortina di ferro' e formulata in termini nucleari la nuova strategia dell'Occidente.

Il 1°luglio 1946 gli USA iniziarono l'ampia serie di esplosioni nucleari sperimentali nell'atollo di Bikini. Nel 1949 fu realizzato il primo test sovietico; due anni più tardi furono sperimentate dagli Stati uniti le prime armi nucleari tattiche, cioè di breve gittata, da impiegare sul campo di battaglia; nel 1952 gli USA fecero esplodere il primo ordigno termonucleare, seguiti, nel 1955, dall'URSS.



Figura 22 - Esplosione della bomba H «Mike», da 5 Megaton (30 ottobre 1952).

Il numero di bombe atomiche americane cresce da 9 (1946), a 13 (1947), a 50 (1948), a 250 (1949), a 450 (1950). Questa crescita del numero delle armi nucleari disponibili, che proseguirà nei 30 anni successivi, è noto come *proliferazione verticale.*

Nel frattempo le superpotenze, come si è detto, svilupparono anche i vettori a lungo raggio d'azione, aerei e missili, e le navi a propulsione nucleare: il primo razzo a gittata intercontinentale, sovietico, è del 1956, e tre anni dopo USA e URSS installarono i primi euromissili.



Figura 23 -Sommergibile nucleare Trident (americano) armato di missili, ciascuno con testate nucleari.



Figura 24 -Sommergibile nucleare sovietico.

I finanziamenti militari per la guerra crebbero a dismisura e una frazione molto consistente degli scienziati e dei tecnologi si impegnò, in modo più o meno diretto, nelle ricerche militari, sia all'Ovest che all'Est.

Anche la Gran Bretagna, nel 1952, realizzò le prime bombe a fissione. In questo caso la proliferazione non rientra semplicemente nel meccanismo già visto di azione-reazione, perché la sicurezza della Gran Bretagna era garantita dal consistente arsenale nucleare degli Stati Uniti (il cosiddetto ombrello nucleare). Giocarono invece l'orgoglio della ex potenza imperiale e la volontà di avere un deterrente autonomo; già negli anni precedenti vi erano stati contrasti con gli Stati Uniti, gelosi del loro monopolio nucleare, anche in vista della realizzazione di impianti per uso civile; nel 1945 infatti gli USA avevano deciso di mantenere il segreto atomico come 'sacro pegno'.

12. Francia e Cina

I fisici francesi erano stati volutamente esclusi dal Progetto Manhattan e dagli sviluppi successivi per la realizzazione di reattori nucleari per uso civile. Dopo la fine della guerra la Francia avviò il suo programma autonomo per realizzare i reattori nucleari; il primo reattore francese fu pronto nel 1948. Nel 1954 considerò la possibilità di fabbricarsi le sue armi nucleari, nonostante l'ostilità degli Stati Uniti e della Gran Bretagna; il programma fu definitivamente varato nel 1958, dopo la crisi di Suez e la minaccia degli Stati Uniti di intervenire contro le forze francesi (e britanniche) che minacciavano l'Egitto (1956). La prima bomba francese fu sperimentata nel Sahara all'inizio del 1960. La decisione ebbe quindi due motivazioni: il prestigio (la Francia voleva riguadagnare il suo *status* in Europa) e la volontà di assicurarsi che nessuna potenza esterna potesse più esercitare un'azione coercitiva.

La Cina fu la quinta potenza nucleare. Giocarono un ruolo centrale i contrasti sempre più acuti con la ex-alleata Unione Sovietica, oltre che l'esigenza di dissuasione verso la minaccia di un intervento nucleare da parte degli Stati uniti. La prima esplosione nucleare sperimentale è del 1964.

Dunque nel caso di Gran Bretagna, Francia e Cina la principale spinta verso la proliferazione fu l'esigenza di possedere una forza nucleare autonoma, per non dipendere dall'ombrello nucleare americano o sovietico.

E l'Italia? Nel 1958 i tre ministri della Difesa di Francia, Germania Federale e Italia si incontrarono a Roma per discutere il progetto di realizzare un armamento nucleare in comune. Successivamente De Gaulle decise per un programma nucleare autonomo e l'accordo svanì.

13 – I test nucleari

Come si è visto, per fabbricare le armi nucleari, perfezionarle, renderle più potenti o più piccole e maneggevoli, le potenze nucleari dovevano sperimentarle; per questo furono fatti molti test nucleari. Questi, fino al 1963, furono effettuati nei deserti e negli atolli disabitati, provocando la diffusione nell'atmosfera di scorie radioattive potenzialmente pericolose. Sotto la pressione dell'opinione pubblica allarmata, nel 1963 Stati uniti,

Unione Sovietica e Gran Bretagna firmarono un accordo per la proibizione dei test atmosferici (PTBT), quelli che provocavano le cadute radioattive (*fallout*).

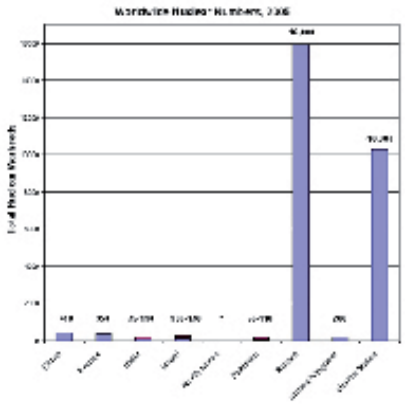


Figura 25 - Test nucleari tra il 1945 e il 1996.

Tre sono, sostanzialmente, gli scopi fondamentali dei test nucleari: studiare gli effetti delle esplosioni nucleari, sviluppare nuove armi, controllare l'efficienza e la sicurezza delle armi già esistenti negli arsenali nucleari. Affinchè un testata nucleare sia considerata «affidabile», é necessario che sia accertata l'impossibilità di innesco della reazione nucleare o di dispersione del plutonio in caso di incidente, che sia efficiente e sicuro l'esplosivo convenzionale che deve innescare l'esplosione nucleare e che la sua potenza corrisponda a quella prevista.

Per ottenere questo scopo, si possono smontare le testate e sottoporre a test tutte le loro componenti, tranne quella nucleare. Inoltre sono utilizzabili (ed utilizzate) tecnologie e programmi di simulazione che oggi rendono del tutto inutili le esplosioni sperimentali delle testate. Un recente rapporto mostra che gli Stati Uniti, ad esempio, possono contare sul fatto che gli esplosivi nucleari sono affidabili per almeno altri trent'anni. Solo e soltanto in un caso le esplosioni nucleari sperimentali sono davvero necessarie: per il perseguimento di piani di ammodernamento dell'arsenale nucleare esistente o di sviluppo di nuovi sistemi d'arma. Attualmente, per esempio, da parte degli Stati Uniti è allo studio una nuove testata capace di penetrare nel terreno e danneggiare silos e bunkers fortificati (Robust Nuclear Earth Penetrator, RNEP). Ed è proprio il fatto che i test sono stati, e sono, determinanti per poter sviluppare la tecnologia nucleare militare che ha reso così difficoltosi e lunghi i negoziati per arrivare ad un trattato che bandisse tutti i test nucleari. Di converso, un bando totale dei test, anche se non sarebbe stata una panacea di per sé, avrebbe contribuito in maniera determinante ad evitare la modernizzazione degli arsenali nucleari e la progettazione e realizzazione di nuove armi nucleari, rallentando così la corsa agli armamenti.

Sta di fatto che risalgono almeno al 1958 i primi tentativi di Stati Uniti, Unione Sovietica e Gran Bretagna di avviare le trattative per un bando totale delle esplosioni nucleari sperimentali. Nel 1963 le allora tre potenze nucleari firmarono un trattato che

proibiva i test nucleari nell'atmosfera, nello spazio esterno e nelle acque e permetteva solo quelle sotterranee. Soltanto nel Settembre del 1996 è stato finalmente approvato il trattato che bandisce tutti le esplosioni nucleari sperimentali (*Comprehensive Test Ban Treaty*, CTBT). Il CTBT mette al bando tutti gli esperimenti nucleari, compresi quelli sotterranei che erano sfuggiti alle maglie del «trattato limitato» sui test atomici del 1963 e del successivo accordo del 1974 sulle «dimensioni» dei test. Il trattato, che istituisce una rete di 201 centri di ispezione in grado di registrare i test atomici, non è comunque ancora in forza, e non lo sarà che 180 giorni dopo essere ratificato da un gruppo di 44 'stati chiave'. Ad oggi ancora 10 'stati chiave', tra i quali Stati Uniti e Cina, non hanno ratificato il trattato e 3 (India, Pakistan Corea del Nord) non lo hanno nemmeno firmato.

Complessivamente, sono state eseguiti circa 550 test atmosferici e 1900 sotterranei.

14. Il trattato di non proliferazione nucleare

Il Trattato di Non-Proliferazione (TNP) risale al 1968. Nell'Articolo VI del Trattato si dichiara solennemente che ogni potenza nucleare «si impegna a concludere in buona fede trattative su misure efficaci per una prossima cessazione della corsa agli armamenti nucleari e per il disarmo nucleare, come pure per un trattato sul disarmo generale e completo sotto stretto ed efficace controllo internazionale». Queste dichiarazioni di principio sono rimaste parole vuote per decenni e ancora oggi non vengono affatto tradotte in fatti e iniziative.

Al momento ci sembra evidente che il Trattato di Non-Proliferazione sia messo in pericolo non solo dall'assoluto mancato rispetto dell'Art. VI da parte delle potenze nucleari che negoziarono e firmarono il trattato nel lontano 1968 (basti pensare al programma di ammodernamento dell'arsenale nucleare britannico attualmente sostenuto dal Governo Blair), ma anche dalla scelta, da parte di potenze come Israele, Pakistan e India, di affidare la loro sicurezza nazionale al possesso di armi nucleari, in un contesto internazionale che ha usato sistematicamente la regola del «due pesi, due misure» e la programmatica subordinazione di presa di posizione agli interessi nazionali e/o strategici del momento. Si pensi, per esempio, al recente accordo nucleare tra Stati Uniti e India, che non ha aderito al TNP (gli Stati Uniti forniranno all'India combustibile nucleare in cambio dell'impegno di aprire alle ispezioni 14 centrali nucleari indiane a uso civile, ma non le otto a uso militare), e alla affermazione, nelle dichiarazione e nei fatti, che sono questioni diverse il possesso da parte di Israele, che non ha aderito al TNP, di circa duecento armi nucleari e la produzione da parte dell'Iran, che ha aderito al TNP, di uranio arricchito.

Il problema del passaggio dal nucleare civile a quello militare è certamente delicato e grave, ma non si può nemmeno dimenticare che, a norma dell'Art. IV del TNP «Nessuna disposizione del presente Trattato deve essere considerata come pregiudizievole per il diritto inalienabile delle Parti di promuovere la ricerca, la produzione e l'utilizzazione pacifica dell'energia nucleare, senza discriminazione e conformemente alle disposizioni

degli articoli I («Ciascuno degli Stati militarmente nucleari, che sia Parte del Trattato, si impegna a non trasferire a chicchessia armi nucleari o altri congegni nucleari esplosivi, ovvero il controllo su tali armi e congegni esplosivi, direttamente o indirettamente; si impegna inoltre a non assistere, né incoraggiare, né spingere in alcun modo uno Stato militarmente non nucleare a produrre o altrimenti procurarsi armi nucleari o altri congegni nucleari esplosivi, ovvero il controllo su tali armi o congegni esplosivi») e II («Ciascuno degli Stati militarmente non nucleari, che sia Parte del Trattato, si impegna a non ricevere da chicchessia armi nucleari o altri congegni nucleari esplosivi, né il controllo su tali armi e congegni esplosivi, direttamente o indirettamente; si impegna inoltre a non produrre né altrimenti procurarsi armi nucleari o altri congegni nucleari esplosivi, e a non chiedere né ricevere aiuto per la fabbricazione di armi nucleari o di altri congegni nucleari esplosivi»).

Oltre a questo, un accordo complementare impegna i Paesi membri del TNP ad autorizzare l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, l'AIEA, a ispezioni più approfondite, miranti a evitare un'illecita proliferazione nucleare

Siamo arrivati al punto in cui la possibilità che un Paese costruisca un suo arsenale nucleare può autorizzare attacchi preventivi, come hanno fatto gli Stati Uniti nel caso dell'Iraq usando a pretesto grottesche bugie proclamate anche in assise come le Nazioni Unite. E d'altra parte, in generale, le motivazioni per cui uno stato può cercare di sviluppare (o ampliare) il proprio potenziale nucleare sono proprio da ricercarsi in una percezione di insicurezza, spesso coniugata con un desiderio di affermazione in senso nazionalistico. («Noi ci sentiamo minacciati e quindi abbiamo bisogno di armi atomiche»). Subito dopo la guerra del Golfo del 1991 un alto ufficiale indiano dichiarò pubblicamente che, se uno stato voleva negoziare con gli Stati Uniti, prima doveva dotarsi di armi nucleari.

Determinanti per il rafforzamento del regime di non proliferazione delle armi nucleari, e primo passo verso l'obiettivo ultimo di eliminare tutte le armi nucleari (il grande sogno di Jo Rotblat), sono le «Zone Libere da Armi Nucleari» (*Nuclear Weapons Free Zones*, NWFZ), nelle quali è proibito effettuare test nucleari, usare, costruire, produrre, acquisire, immagazzinare dispiegare armi nucleari di qualsivoglia tipo. Le NWFZ attuali sono l'Antartide (Trattato dell'Antartide del 1959), l'America Latina (Trattato di Tlatelolco del 1967), il Sud Pacifico (Trattato di Rarotonga del 1985), l'Asia Sud-orientale (Trattato di Bangkok del 1995), l'Africa (Trattato di Pelindaba del 1996) e l'Asia centrale (Trattato di Semipalatinsk del 2006). La possibilità di rendere anche il Medio Oriente una Zona Libera da Armi di Distruzione di Massa (non solo nucleari, quindi, ma anche chimiche e biologiche) sembra oggi piuttosto remota, ma pensiamo che sia un obiettivo da perseguire con determinazione per il grandissimo effetto che potrebbe avere.

15. Proliferazioni successive

Israele, probabilmente aiutato dalla Francia, realizzò le sue armi nucleari fra il 1970 e il 1975; a questo passo fu spinta dall'esigenza di dissuasione verso gli stati arabi che non riconoscevano il suo diritto all'esistenza. Fino a poco tempo fa Israele non ha mai ammesso di possedere armi nucleari, trincerandosi dietro l'affermazione «non ammetto né smentisco». Più recentemente vi è stata una mezza ammissione.

Ricordiamo che Israele, preoccupata per il programma nucleare dell'Iraq, nel 1981 aveva condotto un raid aereo che distrusse il reattore iracheno Osirak in costruzione. Le successive ambizioni nucleari dell'Iraq furono frustrate dapprima dalla guerra, con *Desert Storm*, quindi grazie alle ispezioni degli esperti dell'Agenzia di Vienna (AIEA).

L'India realizzò il suo primo test nel 1974 e sostenne che era stata una esplosione nucleare per scopi pacifici e non militari; nel Maggio del 1998 effettuò cinque esplosioni nucleari sperimentali, in rapida successione. Giocò sicuramente un ruolo importante il contrasto con la Cina (già da un decennio potenza nucleare), con la quale nel 1962 vi furono scontri lungo la frontiera per una contesa sui confini.

Nonostante l'opposizione iniziale degli Stati Uniti, anche a causa della rivalità con l'India, alimentata dalla Guerra endemica nel Kashmir, sempre nel Maggio 1998 il Pakistan effettuò sei test nucleari nel giro di tre giorni. Sembra che gli scienziati nucleari pachistani abbiano passato informazioni importanti sulla tecnologia ad altri stati interessati alla bomba.

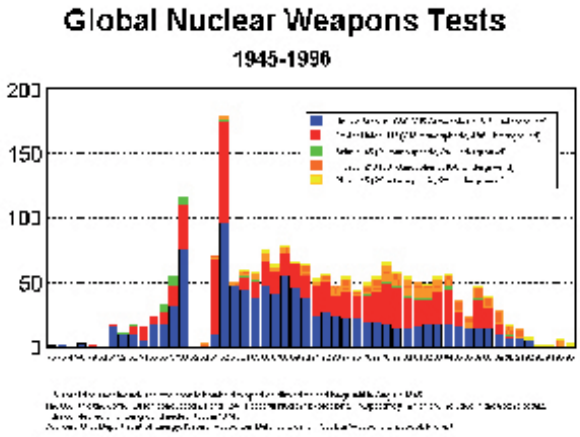




Figure 26 e 27 - Due differenti stime sul numero di armi nucleari nel mondo.

Anche la Libia per un certo tempo ha nutrito ambizioni nucleari, ma le abbandonò qualche anno fa sotto la pressione degli Stati uniti. Un discorso a parte merita il Sud Africa: nella seconda metà degli anni Settanta, quando si sentiva isolato a causa dell'apartheid, costruì alcune bombe; in seguito, nel 1989 (caso unico), le ha autonomamente distrutte.

Il caso più recente di proliferazione orizzontale è quello della Corea del Nord. Le pressioni internazionali affinché rinunci alle sue bombe sono forti ma gli esiti ancora incerti. La preoccupazione internazionale è anche quella che il processo azione-reazione porti il Giappone a ridiscutere l'impegno a non dotarsi di armi nucleari. È di questi giorni (febbraio 2007) la notizia della disponibilità della Corea del Nord a rinunciare al proprio programma nucleare militare in cambio di consistenti aiuti economici e forniture di carburante e reattori ad acqua leggera (non utilizzabili per il processo di arricchimento dell'uranio). La diplomazia potrebbe indurre la Corea del Nord a rinunciare al suo costituendo arsenale nucleare tramite un'iniziativa dell'ONU volta a un trattato di pace che superi finalmente l'armistizio che pose fine alle ostilità della Guerra del 1950-1953; dovrebbe essere riconosciuta l'integrità territoriale delle due Coree e creata nella penisola una zona libera dalle armi nucleari.



Figura 28 - Foto da satellite della centrale nucleare di Yongbyon, Corea del Nord.

Le ambizioni nucleari dell'Iran, ancorché l'interesse militare sia negato dal suo governo, sono cose di questi giorni. Per ora si tratta solo del progetto di arricchimento dell'uranio, e comunque le difficoltà tecniche per ottenere quantità sufficienti di materiale fissile per costruire le bombe sono ancora molte, così che rimane un tempo sufficiente (almeno quattro anni, secondo gli esperti) per condurre trattative. In ogni caso, per mettere le mani avanti, nel febbraio 2007 il Segretario alla Difesa R. Gates ha ribadito che gli Stati Uniti considerano il Golfo Persico e l'intera area di vitale interesse per l'America.

Lo spettro della bomba iraniana (sciita) preoccupa gli stati sunniti come l'Egitto e l'Arabia Saudita e potrebbe innescare nuove proliferazioni. Infatti, non a caso, nel dicembre 2006 il Consiglio di Cooperazione dei sei Stati del Golfo (GCC) ha stabilito per la prima volta un programma di ricerca nucleare.



Figura 29 - Dicembre 2005: Mohamed El Baradei, Direttore dell'AIEA, riceve il premio Nobel per la Pace.

Il responsabile dell'IAEA, Mohamed ElBaradei recentemente ha ammonito che esistono altri trenta stati che sono potenzialmente in grado di produrre armi nucleari: uno scenario poco rassicurante.

16. Dalla MAD alle *guerre giuste*

Per quanto paradossale e immorale possa apparire, la vulnerabilità delle popolazioni assieme alla relativa invulnerabilità delle armi nucleari, sembrava contribuire a garantire la pace: la certezza di una catastrofe planetaria in caso di conflitto nucleare, infatti, funzionava da deterrente e il mantenimento delle condizioni per la distruzione reciproca assicurata (*Mutual Assured Destruction*, MAD) da elemento stabilizzante.

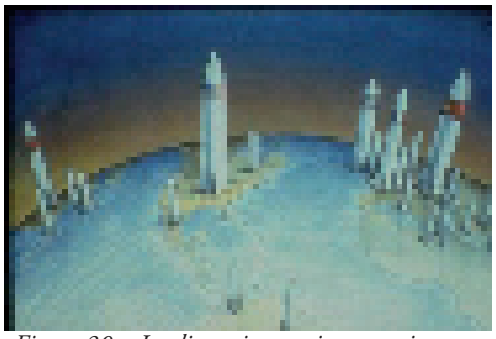


Figura 30 – La distruzione reciproca assicurata.

Durante la guerra fredda, in un quadro politico internazionale caratterizzato e condizionato dall'equilibrio del terrore e dalla minaccia della mutua assicurata distruzione, erano immaginati realistici e apocalittici scenari successivi ad un conflitto nucleare. E molti pensavano che non potesse esserci nulla di più immorale della pace mantenuta dalla minaccia dell'olocausto nucleare. Oggi, al pericolo della mutua assicurata distruzione nel caso di un conflitto nel quale fossero usate armi nucleari, si è aggiunta e sempre più si aggiunge la realtà quotidiana delle carneficine, dei cadaveri straziati dei civili e dei soldati. Alle quotidiane morti di migliaia e migliaia di uomini donne e bambini per fame e malattie e povertà si aggiungono le morti quotidiane di uomini, donne e bambini vittime di guerra e di attentati.

Strategie politiche, e conseguentemente tecnologiche e industriali, sembrano voler perseguire progetti di dominio e di controllo del mondo con l'uso delle armi,

di armi «intelligenti», che riducano al minimo i «danni collaterali», che permettano attacchi disabilitanti l'avversario, in modo da non dover subire rappresaglie. Il quadro di riferimento dei trattati, della ricerca di strumenti che garantiscano la sicurezza internazionale sulla base di accordi e misure atte far crescere la fiducia reciproca è oggi obsoleto.

Sono addirittura privilegiate 'opzioni', tanto immorali quanto contrarie ai fondamenti del diritto internazionale, di attacco «preventivo». È implicito che strategie di questo tipo non possono non esautorare e mortificare organismi internazionali come l'ONU e aprire la strada a ipotesi di dominio e controllo mondiale tutti basati sulla forza militare e sul potere economico. E poiché queste strategie politiche debbono essere sostenibili con adeguate forze armate e appropriati sistemi d'arma, si progettano testate nucleari e convenzionali che possano penetrare nel terreno e distruggere obiettivi interrati fino a decine di metri (come i silos dei missili intercontinentali), bombe e munizioni di precisione a guida laser o tramite GPS (*Global Positioning System*) che alimentano vaneggiamenti di guerre chirurgiche, si utilizzano bombe a grappolo che disperdono proiettili che, se inesplosi, diventano poi mine antiuomo, e così via.

Vogliamo ricordare che tra le giustificazioni ufficiali dei bombardamenti di Hiroshima e Nagasaki, una delle più ricorrenti è che così gli Stati Uniti salvarono un grandissimo numero di vite di soldati americani che sarebbero invece morti se la guerra fosse continuata. La veridicità di questa motivazione, che già di per sé suscita gravi dubbi morali, non è mai stata vagliata fino in fondo per l'opposizione intransigente di staff militari e politici favorevoli all'uso delle bombe. Uomini politici come Churchill e militari come Eisenhower (che era allora il Comandante Supremo delle Forze Alleate) hanno in diverse occasioni dichiarato che già prima dei bombardamenti atomici i Giapponesi erano sconfitti e pronti ad arrendersi e che l'uso barbaro di quei bombardamenti non fu d'alcun aiuto militare. Le bombe atomiche su Hiroshima e Nagasaki sarebbero quindi state sganciate non per ragioni strettamente militari, addirittura con pretesi risvolti umanitari, ma anche e soprattutto perché potente strumento di lotta ideologica e diplomatica, che avrebbe permesso di vincere la prima battaglia della guerra fredda contro l'Unione Sovietica. Sembrano quindi vecchie e logore le motivazioni delle cosiddette «guerre umanitarie» e sicuramente sempre orribili e disumane le conseguenze delle devastazioni aventi come obiettivo strutture e popolazioni civili.

Durante la Seconda Guerra Mondiale, i bombardamenti effettuati dai nazisti su Londra e Coventry, che non erano riusciti a danneggiare significativamente la produzione industriale inglese, riuscirono però a devastare Coventry fino alle fondamenta (non a caso Göbbels coniò il verbo «coventrizzare») e dal febbraio del 1942 all'aprile del 1945, gli alleati sganciarono dagli aerei sulla Germania un milione di tonnellate di bombe in quattrocentomila incursioni aeree, provocando circa 600.000 vittime civili e radendo quasi interamente al suolo numerose città. Lo scopo, voluto e pianificato, di quei bombardamenti aerei indiscriminati sulle città non era colpire obiettivi militari o strategici, ma distruggere il morale della popolazione civile. Anche

in questo caso l'annientamento letterale del nemico, degli esseri umani e delle strutture ed infrastrutture civili, non era un «danno collaterale», ma *LA* motivazione.

Note

[1] 'Fissione' è la rottura del nucleo di uranio in due frammenti di massa intermedia; contemporaneamente vengano emessi due o più neutroni e molta energia (200 MeV).

[2] Storicamente è stato introdotto e adottato il termine 'bomba atomica'; è più appropriato parlare di 'bomba nucleare' e di 'armi nucleari'. Qui le due dizioni vengono usate indifferentemente.

[3] Il plutonio è un elemento che non esiste in natura (transuranico); come l'isotopo leggero dell'uranio (U235), è fissile, ossia: se colpito da neutroni, si spezza in due frammenti più altri neutroni, liberando energia.

[4] Vedi [2].

[5] Vedi [9].

BIBLIOGRAFIA

[1] Alperovitz G., *Un asso nella manica*, Einaudi, Torino 1966.
[2] Blackett P. M. S., *Conseguenze politiche e militari dell'energia atomica*, Einaudi, Torino 1950.
[3] Fieschi F. e Paris C., *Macchine da guerra*, Einaudi, Torino 1995.
[4] Grodzinsk M. e Rabinowich E., *L' età atomica*, Mondadori, Milano 1968.
[5] Halloway D., *L'Unione Sovietica e la corsa agli armamenti*, Il Mulino, Bologna 1984.
[6] Jungk R., *Gli apprendisti stregoni*, Einaudi, Torino 1958.
[7] Lenci F., La folle corsa, *Sapere*, 71, n. 3, 2005.
[8] Powers T., *L' atomica tedesca*, Mondadori, Milano 1994.
[9] Rhodes R., *Dark sun*, Simon and Schuster, New York 1985.
[10] Rhodes R., *The making of the atomic bomb*, Simon and Schuster, New York 1988.
[11] Leo Szilard, *La coscienza si chiama Hiroshima*, Editori Riuniti, Roma 1978.

Il Fisico scettico:

dialogo sul fosforo bianco

Nicola Cufaro Petroni

Unione Scienziati Per Il Disarmo
INFN - Sezione di Bari
Dipartimento di Matematica, Università di Bari

L'8 novembre 2005 un'inchiesta di RaiNews24 realizzata da Sigfrido Ranucci rivelava che nel novembre 2004, durante la battaglia di Fallujah (Iraq), gli USA avevano usato armi al fosforo bianco. In quella occasione l'esercito americano fu accusato di aver operato in maniera illegale e disumana anche per le gravi conseguenze prodotte sulla popolazione civile. Questa notizia – che ha suscitato l'indignazione internazionale – ha anche sollecitato pubbliche prese di posizione e dibattiti, in particolare sulla natura delle armi chimiche e delle armi incendiarie. L'ambiguità e la sottigliezza di alcuni concetti relativi a questi ordigni sono stati messi in evidenza nel corso di una discussione realmente avvenuta (tramite posta elettronica) dal 19 al 25 novembre 2005 fra tre ricercatori da tempo impegnati sul fronte del disarmo, del controllo dei conflitti e della politica internazionale: Francesco Polcaro, Edoardo Magnone e il sottoscritto. Il testo di quello scambio di vedute (con poche correzioni editoriali) viene qui riproposto in forma di 'dialogo' come contributo al dibattito sulle 'armi di distruzione di massa' e agli sforzi internazionali per limitarne, o vietarne, l'uso.

marzo 2007

Personaggi in ordine di apparizione:
FP = Francesco Polcaro (astrofisico, Roma)
NCP = Nicola Cufaro Petroni (fisico, Bari)
EM = Edoardo Magnone (chimico, Tokyo)

FP – Il Comitato Scienziate/i Contro la Guerra, come atto, nel 2006 ha steso un appello[1] contro l'uso delle armi al fosforo, che vi chiedo di leggere e sottoscrivere.

NCP – Non vorrei essere eccessivamente scettico, ma il richiamo insistente alla Convenzione sulle Armi Chimiche (CWC, *Chemical Weapons Convention*) mi lascia perplesso: perché insistere sull'applicazione di un trattato la cui rilevanza per il caso in questione sembra particolarmente dubbia? Come saprai, le armi al fosforo non sono considerate armi chimiche. Non sarebbe meglio invece puntare sul fatto che l'uso indiscriminato ed eccessivo di armi incendiarie (e le armi al fosforo sono

proprio armi incendiarie) in operazioni che coinvolgono anche popolazioni civili sono vietate dal Terzo Protocollo della Convenzione su Alcune Armi Convenzionali (CCCW, *Convention on Certain Conventional Weapons*)?[2]

FP – Ti riassumo brevemente la discussione tecnica avvenuta nel 'Comitato' e che ha portato a questa versione dell'appello:

1. i filmati dimostrano chiaramente che le granate al fosforo bianco (WP*, White Phosphorus*) usate a Falluja NON erano munizioni incendiarie ma 'fumogene', dato che esplodevano in aria e NON sul bersaglio, come ovviamente debbono fare proiettili incendiari per produrre il loro effetto;
2. i cadaveri mostrati nel filmati apparivano mummificati, evidente effetto di una rapida disidratazione, mentre NON mostravano effetti di ustioni localizzate, come sarebbe avvenuto se fossero stati colpiti da frammenti di fosforo in combustione o se fossero stati uccisi dagli incendi da questi procurati;
3. le testimonianze parlano di «bruciature al di sotto degli abiti», prova evidente che l'agente ustionante non era termico ma chimico, in forma di polvere sottile o di gas;
4. le granate fumogene al WP funzionano per l'ossidazione del fosforo ad anidride fosforica, che si forma proprio come polvere sottile;
5. l'anidride fosforica si idrata usualmente ad acido fosforico, ma, se l'ambiente è secco (e, in Iraq di notte l'umidità è usualmente quasi zero), ciò non può avvenire. Per altro le immagini mostrano 'nubi' che scendono verso il basso, non colonne che si innalzano, come sarebbe successo se la reazione tra anidride fosforica e vapor acqueo fosse avvenuta;
6. questa polvere di anidride fosforica avrebbe avuto proprio l'effetto di desidratare i tessuti organici di chi ne fosse venuto a contatto, senza danneggiare gli abiti, fatti di sostanze che non contengono acqua;
7. le reazioni chimiche aspettate, lo stato dei corpi delle vittime e lo stesso nome dell'operazione sono compatibili con l'ipotesi che il territorio di Falluja sia stato cosparso, tramite l'uso di granate 'fumogene', di polvere di anidride fosforica, per potere attaccare coloro che erano al riparo in gallerie (contro i quali ovviamente granate incendiarie esplose sul terreno non avrebbero avuto alcun effetto)
8. quindi, a norma del trattato sulle armi chimiche, si tratta di attacco chimico, non con armi incendiarie.

NCP – Ecco quel che ne penso:

1. Non capisco nulla di chimica e di effetti biologici di sostanze chimiche. Pertanto le mie considerazioni possono essere poco nel merito. Piuttosto, sono sul metodo e su quel che 'si sa' leggendo articoli più o meno informati.

2. Quanto alle argomentazioni che mi porti: mi sembra che si tratti di un 'teorema' costruito senza visione diretta degli oggetti della discussione. I filmati sono importanti ma non so quanto permettano di trarre delle conclusioni. Sarebbe la prima volta, comunque, a mia conoscenza, che delle munizioni fumogene sono accusate di produrre simili effetti. Edoardo Magnone (primo firmatario di questo documento, e certamente persona esperta) sostiene che anche i lacrimogeni usati a Genova nel 2001 erano usati come armi chimiche: non so però dove ha portato questa sua tesi (da un punto di vista legale, dico).

3. Come impressione personale mi sembra che si possa anche pensare ad effetti termici di «arrostimento» (quello che sul sito di GlobalSecurity[3] viene definito «*Bombenbrandschrumpfeichen*, meaning *firebomb shrunken flesh*») da incendi anche occasionalmente prodotti dalle munizioni al fosforo se usate come fumogeni. Inoltre, recentemente il Pentagono ha ammesso che le munizioni al fosforo sono state sparate direttamente sui nemici, e non con intenti fumogeni. D'altra parte non è vero che le armi incendiarie non hanno effetto contro chi si trova nelle gallerie: i soldati tedeschi arrostiti nei bunker ne sono sinistra testimonianza. Rileggete quello che dice J. Pike su GlobalSecurity[4].

4. Se le munizioni sono state usate come fumogeni, esse sono state usate in maniera legale. Se hanno provocato effetti chimici aggiuntivi, questo non cambia la loro natura in armi chimiche. Una bomba atomica non diventa un'arma chimica perchè il plutonio è tossico: e quindi resta un'arma legale. Anche l'uranio impoverito è tossico (e molto più pericoloso per questo che per le radiazioni) ma non è un'arma chimica perchè è usato come penetratore, non per le sue caratteristiche tossiche. Anche i fumi degli incendi ordinari sono pericolosi. Scusami la pedanteria, ma se si vogliono usare i trattati bisogna guardare alle virgole.

5. Tutta da dimostrare (e mi sembra che sia da escludere se si dice che sono state usate come fumogeni) resta poi l'accusa secondo la quale le munizioni al fosforo sarebbero state usate intenzionalmente per i loro effetti tossici, e non come fumogeni. D'altra parte, senza questo, non credo che si possa parlare di armi chimiche anche interpretando largamente la CWC. Peraltro, mi sembra strano che si sia improvvisamente scoperta l'utilità di questo uso anomalo di armi costruite per altri scopi.

6. Le argomentazioni portate mi sembrano comunque interessanti e andrebbero sottoposte al vaglio di qualche esperto (anche straniero) che si intenda di queste cose. Mi sembra invece che restino un vostro fatto privato (o mi sbaglio?) con il risultato che la dichiarazione che avete prodotto resta immotivata. Sono state diffuse e discusse in qualche modo?

Detto questo, sicuramente fra di voi c'è chi ne capisce molto più di me su queste

cose, ma gli argomenti non mi sembrano convincenti.

Probabilmente la realtà è più banale pur restando drammatica. Resto dell'opinione che sarebbe bene sostenere una campagna contro l'uso inumano di armi convenzionali (come suggerisce anche il quotidiano inglese *The Independent*) che già imbarazza molto gli americani, piuttosto che sostenere una tesi che - per il momento - mi sembra difficilmente credibile. Se invece le vostre argomentazioni dovessero trovare delle conferme. sono evidentemente disposto ad ammettere di essere stato eccessivamente scettico.

A testimonianza del fatto che si tratta di argomenti controversi ti allego due articoli di *The Independent*[5] con varie opinioni sulla faccenda delle armi chimiche. Ad esempio, «Professor Paul Rodgers of the University of Bradford, Department of Peace Studies ... said «white phosphorus would be considered as a chemical weapon under international conventions if it was 'deliberately aimed at people to have a chemical effect'»[6]. Dunque il problema è proprio l'intenzione di usare gli effetti chimici (cioè tossici, se capisco bene).

EM – Di tutte le interessanti considerazioni di Nicola Cufaro, personalmente sono stato positivamente colpito dai punti 4) e 5). Questi due punti mi hanno fatto riflettere su una cosa molto importante. Visto che siamo tra amici vorrei divagare un pò sul tema.

Mi è venuto subito da pensare al fatto che se io volessi uccidere mia nonna per ereditare una risicata eredità, lo potrei fare con dello zucchero. L'innocuo zucchero, sapendo che mia nonna soffre di una forma acuta di diabete, potrebbe essere usata come arma per causarne la morte. Intenzione o non intenzione (in coscienza e conoscendo l'iperglicemia cronica di mia nonna), non cambia il risultato. E il fatto che io intenzionalmente ho portato tutti i giorni a casa sua delle torte fanno di me, comunque, un assassino. Processabile e punibile, anche se ho usato del semplice zucchero. Però, per non divagare troppo e non cadere (salire?) nella filosofia spicciola, mi sembra di capire che Cufaro riflette sull'intenzionalità dell'atto. Credo di interpretare giusto, dicendo che il punto che potrebbe fare la differenza è proprio la volontà.

Però, velocemente, non credo che basti la volontà/intenzionalità nell'uso di una sostanza per fare di questa un'arma chimica (l'approccio soggettivo sempre poco dimostrabile). Credo invece che la *Convenzione sulla proibizione dello sviluppo, produzione, immagazzinaggio ed uso di armi chimiche e sulla loro distruzione* contempli anche un aspetto più oggettivo.

Mi riferisco al fatto che comunque nelle 'Direttive per la Tabella 1' (in particolare sottolineo i punti a e b) si legge che:

> Si dovrà tener conto dei seguenti criteri al fine di includere un composto chimico o un precursore nella Tabella 1: a) se il composto chimico o precursore è stato sviluppato, prodotto, immagazzinato o utilizzato come arma chimica, secondo quanto definito all'Articolo II;

> b) se, in ragione del suo alto potenziale, costituisce in ogni caso un forte rischio per l'oggetto e lo scopo della presente Convenzione se usato in attività proibite dalla presente Convenzione, in quanto corrisponde a una o più delle seguenti caratteristiche:
>
> i) possiede una struttura chimica strettamente legata a quella degli altri composti chimici tossici elencati alla Tabella 1 e ha, o si può presumere che abbia, proprietà affini;
>
> ii) presenta una tossicità letale o incapacitante nonché altre proprietà che gli consentirebbero di essere utilizzato come arma chimica;
>
> iii) può essere utilizzato come precursore nella fase finale individuale tecnologica di produzione di un composto chimico elencato alla Tabella 1, a prescindere se tale fase è realizzata negli impianti, nelle munizioni o altrove.

Anche nelle 'Direttive per la Tabella 2' possiamo leggere che:

> I seguenti criteri saranno adottati per decidere se un composto chimico non elencato alla Tabella 1 o un precursore ad un composto chimico della Tabella 1 o ad un composto chimico elencato alla Tabella 2, Parte A, debbano essere inclusi nella Tabella 2:
>
> a) il composto chimico o precursore costituisce un rischio significativo per l'oggetto ed il fine della presente Convenzione in quanto presenta una tossicità letale o incapacitante nonché altre caratteristiche che potrebbero consentirgli di essere usato come arma chimica.

Quindi, pur non rientrando nel punto 'a' (delle direttive della Tabella 1), forse siamo in presenza di una sostanza che rientra nel punto 'b' (i, ii) di tali direttive e nel punto 'a' delle direttive per la Tabella 2! Quanto leggiamo dalla Convenzione dovrebbe fare pensare, ancora una volta, che «se, in ragione del suo alto potenziale, [il composto chimico o precursore] costituisce in ogni caso un forte rischio per l'oggetto e lo scopo della presente Convenzione» esso dovrà essere riconsiderato «al fine di includere il composto chimico o il precursore nella Tabella 1».

Ricordando anche che queste tabelle identificano solo «i composti chimici che sono oggetto delle misure di verifica secondo le disposizioni dell'Annesso sulla Verifica. Ai sensi dell'Articolo II, sotto-paragrafo 1 a)» e che le stesse quindi 'non costituiscono una definizione dei composti chimici', possiamo dire che la 'chimicità' del fosforo bianco («tossicità letale o incapacitante nonché altre caratteristiche che potrebbero consentirgli di essere usato come arma chimica») fa di questo un'arma chimica! Non l'intenzione. Quest'ultima può esserci in coscienza o meno, però la 'chimicità' (perdonatemi la parola, ma rende l'idea) del composto è un dato di fatto, un valore assoluto da non confondere, in questo caso, con un valore 'morale' o basato sulla sola volontà.

NCP – Vorrei rifletterci di più, ma vi espongo lo stesso qualche osservazione immediata.

Che sia proprio l'intenzione a fare l'arma chimica lo confermano due opinioni che sono state espresse di recente proprio in merito a questa vicenda:

1. *The Independent*, 16 novembre 2005:

> «Professor Paul Rodgers [...] said white phosphorus would be considered as a chemical weapon under international conventions if it was 'deliberately aimed at people to have a chemical effect[7] ... It is not counted under the chemical weapons convention in its normal use but, although it is a matter of legal niceties, it probably does fall into the category of chemical weapons if it is used for this kind of purpose directly against people.'[8]»

2. *BBC News*, 16 novembre 2005:

> The CWC is monitored by the Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons (OPCW), based in The Hague. Its spokesman Peter Kaiser was asked if WP was banned by the CWC and he had this to say: 'No, it's not forbidden by the CWC if it is used within the context of a military application which does not require or does not intend to use the toxic properties of white phosphorus. White phosphorus is normally used to produce smoke, to camouflage movement. If that is the purpose for which the white phosphorus is used, then that is considered under the Convention legitimate use. If on the other hand the toxic properties of white phosphorus, the caustic properties, are specifically intended to be used as a weapon, that of course is prohibited, because the way the Convention is structured or the way it is in fact applied, any chemicals used against humans or animals that cause harm or death through the toxic properties of the chemical are considered chemical weapons.[9]

Soprattutto l'opinione di Kaiser mi sembra autorevole, visto che viene dall'interno della OPCW. Se invece fosse la 'chimicità' a fare l'arma chimica (se ho capito bene le tue argomentazioni) torno alla mia domanda: le armi nucleari sono proibite dalla CWC perchè contengomo plutonio (notoriamente super-tossico)?

EM – Da «Definition of 'purposes not prohibited under the Convention'» (Definizione di 'scopi non proibiti in base alla Convenzione'), in http://www.opcw.org/html/db/imp_kit/measure_08.htm, leggo, e riporto parzialmente, che:

> 'Purposes not prohibited under the Convention' means
>
> c. Military purposes not connected with the use of chemical weapons and not dependent on the use of the toxic properties of chemicals as a method of warfare.
>
> Commentary:
>
> The model statutory language above comes directly from the Convention, Article II(9). It is intended to delineate the scope of what is not prohibited under the Convention for the purposes of developing, producing, stockpiling and using chemicals, including toxic chemicals [...]
>
> The language in subparagraph (c) is carefully crafted. Chemicals can be used for military purposes, even as weapons, as long as the predominant effect from use

> of the weapon is not toxicity vis-à-vis humans or animals. For example, rocket fuels, some of which are toxic chemicals, can be used in weapons because their military use does not depend on the toxic properties of the fuel.[10]

Quindi, questo mi porta a dire, sempre citando gli stessi documenti della OPCW, che i 'composti chimici' possono eventualmente essere usati nello scenario di guerra se, e solo se, l'effetto predominante causato dagli stessi non è la tossicità. Se al contrario l'effetto maggioritario è proprio quello di causare la morte o la sofferenza per mezzo di reazioni chimiche o tossiche allora il suo utilizzo è proibito dalla convenzione.
In questo caso, rimanendo sicura la tossicità del composto, ritengo che l'effetto «predominante» è stata proprio la sua 'chimicità'. E quest'ultima, forse, fa della stessa sostanza un'arma chimica. Quindi, mi par di capire, che è il 'Risultato' che fa di un composto un'arma chimica e non la sola Volontà/Intenzione nell'utilizzo.
Ragionando per assurdo, se fosse vero questo discorso «esiste-la-volontà-allora-arma-chimica/non-esiste-volontà-allora-non-arma-chimica», questa volta la mia linea difensiva, durante il processo nel quale sono accusato di aver ucciso mia nonna insulino-dipendente con dello zucchero, dovrebbe essere basata unicamente sul fatto che, pur sapendo degli effetti secondari («predominanti» nel caso di mia nonna), non era nelle mie intenzioni fare dello zucchero un'arma chimica!
Se è così che funziona allora questa è davvero una linea difensiva vincente e avrò speranza di ereditare. In altre parole, pur sapendo che la chimica del fosforo è diversa da quella dello zucchero (non per mia nonna, che potrebbe morire per entrambi), il *risultato* finale pultroppo non cambia: io sarò libero di ereditare se, semplicemente, riuscirò a dimostrare che non ho basato il mio agire sulla tossicità dello zucchero (relativo a come lo uso e contro chi).
Ancora, se invece dovessi portare tante torte-gelato nel Reparto di Cura Intensiva di un Centro Diabetologico potrei, seguendo questo discorso, non essere accusata di tentata (riuscita) strage perche non era nelle mie intenzioni portare sostanze (per loro!) tossiche (effetti primari per loro, secondari forse per me). Infatti, i mie avvocati dovranno semplicemente dimostrare che ho fatto questa azione per soddisfare, ad esempio, il mio bisogno di portare nel reparto tanta allegria, amore e dolcezza. L'intenzione era diversa, ed io eredito. Gli effetti si azzerano se io l'ho fatto con affetto.
Tu mi chiedi «Se invece fosse la 'chimicità' a fare l'arma chimica (se ho capito bene le tue argomentazioni) torno alla mia domanda: le armi nucleari sono proibite dalla CWC perchè contengomo plutonio (notoriamente super-tossico) ?»
La risposta è negativa. Come dicevamo prima: «For example, rocket fuels, some of which are toxic chemicals, can be used in weapons because their military use does not depend on the toxic properties of the fuel».
Nel caso del plutonio, se uccido delle persone per mezzo degli effetti secondari (in minoranza, in questo caso) allora forse non è la mia materia ma rientra nel diritto internazionale. Ugualmente posso dire che se utilizzo una bomba al plutonio non è

certo (solo) per i suoi effetti secondari (tossici).

Rientriamo, anche in questo caso, nella 'chimicità' dell,oggetto e, naturalmente, nella fondamentale distinzione tra effetti primari e secondari (terziari, etc).

I primari (potenziali) fanno rientrare una sostanza tossica nella convenzione sulle armi chimiche e non, come chiedi, in quella sulle armi nucleari. Di contro, sono gli effetti primari di un'arma nucleare che non la fanno rientrare nelle convenzioni, ad esempio, sulla difesa dell,ambiente e quelli per cui le mine anti-uomo non vengono mai citate nelle convenzioni sul diritto marittimo. Se vogliamo è *un'approssimazione all'effetto primario*, utile dal punto di vista del diritto ma, come tutte le approssimazioni, ci portiamo dietro degli errori.

Dicevi in una osservazione precedente che «... se hanno provocato effetti chimici aggiuntivi, questo non cambia la loro natura in armi chimiche».

Verissimo, ma ritengo che sarei condannato ugualmente per aver volontariamente somministrato del 'veleno' ai pazienti del Reparto di Cura Intensiva di un Centro Diabetologico (o a mia nonna) perche, in fondo, la riconosciuta tossicità (relativa, in questo caso) è stato l'effetto predominante, non secondario, pur avendo dimostrato che le mie 'intenzioni' erano diverse.

Il fatto che la sostanza è tossica (mortale) per loro dovrebbe passare in secondo piano durante il dibattimento processuale? La mia volontà/intenzione non è legata al fatto che se utilizzo lo zucchero con queste modalità diventa un veleno (arma chimica)? Oppure, secondo te, in un tribunale potrebbe essere utilizzata come prova dall'accusa?

NCP – Ancora una risposta su due piedi (per il resto vorrei riflettere):

1. Le tue argomentazioni sull'oggettività dell'essere arma chimica mi sembra che contrastino con le dichiarazioni di P. Rodgers e P. Kaiser da me riportate Quale è in merito il punto di vista ufficiale (se c'è) della OPCW? C'è una giurisprudenza sull'argomento, o è tutto lasciato alle tue e mie argomentazioni? In altre parole: le tue argomentazioni sono riprese da altri ufficiali della OPCW?

2. Il tuo paragone con l'assassinio della nonna non mi sembra calzante. Un assassinio è sempre vietato, quale che sia il mezzo con il quale viene perpetrato. In guerra invece si ritiene lecito uccidere i nemici. I divieti - almeno per ora - riguardano solo i mezzi. Ed è di questo che stiamo parlando. Semmai il tuo paragone dovrebbe essere così riproposto (in maniera provocatoriamente paradossale): *se gli irakeni fossero tutti diabetici e gli americani lanciassero su di loro armi che tra i loro composti annoverano lo zucchero, potremmo dire che si tratta di arma chimica? Potremmo dirlo se gli effetti dello zucchero non fossero intenzionali, ma solo collaterali anche se rilevanti?*

EM – Quando dici: «Il tuo paragone con l'assassinio della nonna non mi sembra calzante. Un assassinio è sempre vietato, quale che sia il mezzo con il quale viene perpetrato. In guerra invece si ritiene lecito uccidere i nemici. I divieti - almeno per ora - riguardano solo i mezzi. Ed è di questo che stiamo parlando», non sono completamente in accordo, ed ora, anche io su due piedi, cercherò di essere breve.

A me sembra che sia calzante il paragone con mia nonna (se mi sente mi uccide lei!) e non sono in accordo che «In guerra invece si ritiene lecito uccidere i nemici». Infatti, in questo caso, bisogna analizzare sia le modalità del 'conflitto' che la figura del 'nemico'.

Non è mai stata dichiarata una situazione di guerra da nessuna delle parti (come, credo, richiede il diritto bellico internazionale). Quindi, su queste basi, anche l'esercito irakeno è irregolare, sacche di resistenza, civili, etc. Se questo è vero, allora è un'assasinio (come mia nonna) dal punto di vista internazionale (se questo non è vero allora è un'invasione).

All'opposto, se mi dovessi sbagliare, e prima era una guerra con i crismi internazionali allora ora non lo è più (pace?) perche gli USA hanno dichiarato la fine della guerra già molti mesi orsono. Quindi, se questa ultima ipotesi è vera non si tratta più di militari ma di civili che fanno resistenza ad un esercito 'altro'. Le cose cambiano, e forse peggiorano ulteriormente, per chi utilizza armi al P su civili (vietato dalla Convenzione sulle Armi Chimiche).

Comunque sia, in tutti i casi (invasione, guerra, post-guerra o pace), l'assassinio rimane! E non è una mia personale opinione. Infatti, per quanto riguarda le convenzioni, il diritto bellico moderno e, da quanto mi par di capire, la disciplina dei mezzi di condotta della guerra si possono reggere nelle tre regole auree del I Protocollo di Ginevra del 1977 (convenzione grande mangia convenzione piccola):

1. «In ogni conflitto armato il diritto delle Parti in conflitto di scegliere metodi e mezzi di guerra non è illimitato»;
2. «è vietato l'impiego di armi proiettili e sostanze nonché metodi o mezzi di guerra capaci di causare mali superflui o sofferenze inutili»;
3. «Allo scopo di assicurare il rispetto e la protezione della popolazione civile e dei beni di carattere civile, le Parti in conflitto dovranno fare, in ogni momento, distinzione fra la popolazione civile ed i combattenti, nonché fra beni di carattere civile e gli obiettivi militari, e, di conseguenza, dirigere le operazioni soltanto contro obiettivi militari».

Bastano questi tre brevissimi principi fondamentali (da cui derivano i principi di ogni altra convenzione) per capire cosa è successo senza tanti giri di parole. Se queste tre regole sono state disattese (non andiamo per il sottile) vuol dire che ho visto bene.

Seconto te, almeno una di queste tre regole non è stata rispettata?

NCP – Infatti..., ma allora:

1. tutti quelli uccisi nel conflitto in Iraq (guerra?) sarebbero 'assassinati', e non so quanto lontano si va su questa strada;
2. giustamente richiami le altre convenzioni sui comportamenti in guerra che mi sembrano più appropriate invece che la CWC ...

EM – Credo che il punto fondamentale sia proprio l'interpretazione del paragrafo c (convenzione armi chimiche) sotto riportato, e che per comodità cito: «c. Military purposes not connected with the use of chemical weapons and not dependent on the use of the toxic properties of chemicals as a method of warfare.» La difesa da parte americana potrebbe basarsi proprio su questo: *per chi è rimasto vivo ... Noi non avevamo assolutamente l'intenzione, scusate tutti. Amici come prima.*

Se basta dire che non si aveva l'intenzione di sparare del fosforo sulla popolazione civile per non rientrare nelle convenzioni (comunque mai sottoscritte) allora preferisco essere uomo di scienza che di diritto.

Infine, dal punto di vista personale il primo punto da te posto mi trova irreparabilmente in accordo...anche se, pur rimanendo valide le tre regole di Ginevra, capisco che non mi porta da nessuna parte.

NCP – Non ci sarebbe bisogno di questo per preferire di essere uomini di scienza... A parte questo, però, mi sembra che la tua posizione si possa riassumere nella richiesta che le armi al fosforo, finora classificate come incendiarie, siano invece classificate come armi chimiche (indipendentemente dalle intenzioni). Non so però se questo possa essere messo all'ordine del giorno.

Inoltre, tornando un pò più indietro, che base fattuale abbiamo per dire che quel che viene mostrato nelle immagini del servizio di RaiNews24 sia stato proprio prodotto dal fosforo bianco? Nessuno di noi ha esamnato i resti umani e mi sembra difficile ragionare su immagini di un film. Io invece insisterei parecchio sull'uso improprio e disumano di armi convenzionali (incendiarie), uso, come tu ricordavi, vietato da altre convenzioni. Peraltro, queste accuse stanno facendo un pò di rumore. Due giorni fa l'*Herald Tribune* riportava un lungo articolo (con foto dei fuochi d'artificio) nel quale si deplorava la maniera maldestra con la quale gli Americani hanno prima negato e poi ammmesso l'uso del fosforo. Tra l'altro a molti deve essere sfuggito (ma io ho copia del giornale in questione) che sempre l'*Herald Tribune* del 10 novembre 2004 (non 2005!) proprio durante l'attacco di Falluja riportava in prima pagina una foto a colori di soldati americani che scappano dinanzi ad una 'granata al fosforo bianco' esplosa per errore nelle loro vicinanze! Altro che «non abbiamo usato il fosforo».

In ogni caso direi che l'obiettivo principale dovrebbe essere quello di mettere politicamente in imbarazzo l'amministrazione Bush per quello che combinano in Iraq, tanto dinanzi a un tribunale (nazionale o internazionale) non li vedremo mai neanche se ammazzassero la nonna. E questo risultato si raggiunge anche senza la CWC.

EM – Credo che siamo arrivato al punto cruciale che noi, uomini di scienza, non possiamo dimostrare, convenzione alla mano, che il fosforo è un'arma chimica o che essa è elencata tra le armi chimiche soggette a controllo da parte delle commissioni CWC.

Però, non mi sento di negare anche la loro ammissione. E a questo proposito possiamo semplicemente confermare la versione americana e dire che, pur non avendo fatto analisi direttamente a Falluja, hanno usato il fosforo come da loro sostenuto (solo in seconda battuta).

Quindi direi che possiamo appellarci al protocollo di Ginevra del 1977 (i tre punti sotto riportati) e al punto 'c' della CWC ('purposes not prohibited under the Convention'): «Military purposes not connected with the use of chemical weapons and not dependent on the use of the toxic properties of chemicals as a method of warfare». A mio avviso quest'ultimo, in particolare, lascia ancora uno spiraglio per considerare l'uso del fosforo direttamente sui civili come *una cosa da non fare*. Cosa ne pensi?

NCP – Concordo con molte delle cose che dici, ma resto convinto del fatto che i trattati ai quali conviene appellarci sono il protocollo di Ginevra del 1977 e la Convention on Certain Conventional Weapons del 1980, Protocol III sulle armi incendiarie. Le armi chimiche possono essere nominate (anche con insistenza) solo sperando che all'opinione pubblica baleni lo spettro del fatto che anche gli USA commettono, o sono sul punto di commettere, violazioni della CWC. Ma oltre questo sospetto non credo che si possa andare.

EM – Concordo al 100%, come ho proposto nelle mie precedenti, per il protocollo di Ginevra e per la Convention on Certain Conventional Weapons e, senza insistenza, credo che un solo riferimento a quanto trovato (punto c) possa bastare per prendere una posizione decisa.

NCP – Scusami, ho perso il filo: quale sarebbe la «posizione decisa»?

EM – Ti capisco, anche io ho forse perso il filo di questo, devo dire la verità, piacevolissimo scambio di opinioni. Da dove siamo partiti? Credo dalle tue osservazioni a Francesco, dove dicevi tra le altre cose che: «Resto dell'opinione che sarebbe bene sostenere una campagna contro l'uso inumano di armi convenzionali (come suggerisce anche l'*Independent* che vi ho citato) che già imbarazza molto gli americani, piuttosto che sostenere una tesi che - per il momento - mi sembra difficilmente credibile. Se invece le vostre argomentazioni dovessero trovare delle conferme sono evidentemente disposto ad ammettere di essere stato eccessivamente scettico.»

Quindi, con «posizione decisa» mi riferivo a quella di sostenere ed intraprendere al più presto 'una campagna contro l'uso inumano di armi convenzionali' da parte dell'USPID. Credo che già questa campagna sia una 'posizione decisa' e altamente qualificante per noi tutti. Mi permetto di parlare al plurale perche se intraprenderai, come dicevi, tale campagna sarò dei vostri! Mi auguro, con quanto da te detto, di avviare tale campagna con voi.

NCP – Direi di si, la campagna contro l'uso inumano delle armi convenzionali è sacrosanta e mi trova pienamente consenziente. Peraltro sono quelle che fanno più morti e feriti di tutte ... Grazie comunque per lo scambio: spero di avere qualcosa da proporvi presto.

Allegato 1.

Comunicato del Comitato Scienziate e Scienziati contro la guerra (15 Novembre 2005)

Le recenti rivelazioni da parte di alcuni mass-media sull'operato delle forze statunitensi durante l'assedio di Falluja ci spingono a prendere posizione in quanto scienziate e scienziati spinti dalla volontà di usare a fini di pace le competenze acquisite per il lavoro che facciamo.

L'uso di WP (Willi Pete, ovvero il fosforo bianco nel gergo militare), come documentato in particolare dal servizio di Ranucci su RAInews24 (vedi: http://www.rainews24.it/Notizia.asp?NewsID=57784), costituisce una violazione del principio di base della Convenzione sulle Armi Chimiche, cui gli Stati Uniti aderiscono dal 1997. La convenzione infatti si pone come fine «la proibizione e l'eliminazione di tutti i tipi di armi di distruzione di massa; convinti che la completa ed effettiva proibizione dello sviluppo, produzione, acquisizione, immagazzinaggio, detenzione, trasferimento ed uso di armi chimiche e loro distruzione, rappresenta un passo necessario verso il conseguimento di tali obiettivi comuni».

Il WP, come il Napalm, è una sostanza classificata come «incendiaria» il cui uso in guerra sarebbe permesso in circostanze ben definite. Aldilà di usi 'legalmente permessi e vietati, però, il risultato sui civili (previsto, ed anzi cercato dai militari USA), costituisce un fatto documentato ed ormai indubitabile.

L'utilizzo di queste tecniche sulla popolazione civile è di gravità inaudita, suscita il nostro orrore, e ci impone di denunciare con forza l'abominio che rappresenta: la trasformazione di conoscenza, bene comune dell'umanità, in strumento di distruzione di massa.

L'episodio (ammesso che di episodio si tratti e non di strategia deliberata) è reso ancora piu` grave dai tentativi di impedire le testimonianze, facendo pagare prezzi altissimi e personali ai giornalisti non-embedded per il coraggio delle loro denunce.

Come se non bastasse, una volta svelata la strage nascosta, l'amministrazione USA tenta ancora di minimizzare e/o negare l'accaduto e i suoi effetti drammatici.

Ma le conseguenze di tale gesto potrebbero essere ancora più gravi: ci domandiamo infatti su quale base si potranno ritenere vincolanti tutti i trattati e le convenzioni con cui si e` cercato di costruire un mondo vivibile, nonostante la propensione umana alla guerra. Il comportamento dell'esercito statunitense oggi in Iraq, come trenta anni prima in Vietnam, come anche la guerra chimica messa in atto dalla NATO contro la cittadinanza jugoslava (i cui effetti di lungo periodo sono stati rilevati anche da organismi internazionali) fanno ridiventare 'prassi bellica ordinaria' quei crimini di guerra che si speravano anditi per sempre dalla Storia.

Chi mai si sentirà obbligato a non diffondere malattie, a non avvelenare le acque, a non 'distruggere il nemicò anche usando armi atomiche? Se è concesso ai più potenti di non seguire le regole da loro stessi imposte a tutti gli altri, perché chi già soffre per i

loro soprusi non dovrebbe usare le stesse armi?

Malgrado tutti gli impegni solenni pronunciati dopo Hiroshima e l'Olocausto, dopo il Vietnam, si stanno ripetendo orrori che speravamo espulsi dalla storia; orrori che saranno ancora un volta pagati da tutta la collettivita` mondiale, in termini fisici e sociali, a partire come sempre dai piu` poveri ed indifesi.

È possibile che i veri responsabili di tutto questo non saranno mai ufficialmente giudicati e condannati, magari appellandosi a cavilli (il WP non è compreso nell'elenco delle armi chimiche, gli USA non hanno mai firmato il protocollo di Ginevra sulle armi incendiarie, ecc.), ma tutte le persone devono sapere quali sono gli interessi strategici ed economici che rendono il mondo un luogo in cui e` sempre piu` difficile e doloroso sopravvivere.

È necessaria ed urgente una reazione molto decisa, che già si intravede nelle prime mobilitazioni popolari. A queste aggiungiamo da parte nostra la ferma richiesta che sia fatta piena luce su questo come su altri episodi recenti di guerra da parte di USA e NATO, e 'coalizioni di volenterosi' di cui disgraziatamente fanno parte anche forze del nostro Paese. Chiediamo chiare prese di posizione ed azioni conseguenti dei nostri esponenti politici, che devono decretare il rientro immediato delle nostre truppe e farsi portatori di richieste presso tutti gli organismi internazionali specifici (CWC) e generali (ONU) affinché essi si pronuncino su questa guerra, su questo episodio, su questo criterio di due pesi e due misure nei rapporti tra Stati.

Per parte nostra, ribadiamo il nostro impegno a non collaborare con qualsiasi attività connessa con l'industria bellica (v. http://www.carta.org/campagne/pace/050302scienziati.htm), ed esprimiamo la ferma condanna di ogni forma di sopraffazione dei popoli e delle persone. Rifiutiamo il coinvolgimento della scienza per questi scopi ed invitiamo tutte le persone, scienziate/i in particolare, ad operare per un mondo di pace.

Allegato 2.

Convention on Certain Conventional Weapons
Protocol III
Protocol on Prohibitions or Restrictions on the Use of Incendiary Weapons.
Geneva, 10 October 1980[11]

Article 1
Definitions

For the purpose of this Protocol:

1. 'Incendiary weapon' means any weapon or munition which is primarily designed to set fire to objects or to cause burn injury to persons through the action of flame, heat, or combination thereof, produced by a chemical reaction of a substance delivered on the target.

    a) Incendiary weapons can take the form of, for example, flame throwers, fougasses, shells, rockets, grenades, mines, bombs and other containers of incendiary substances.

    b) Incendiary weapons do not include:

        i) Munitions which may have incidental incendiary effects, such as illuminants, tracers, smoke or signalling systems;

        ii) Munitions designed to combine penetration, blast or fragmentation effects with an additional incendiary effect, such as armour-piercing projectiles, fragmentation shells, explosive bombs and similar combined-effects munitions in which the incendiary effect is not specifically designed to cause burn injury to persons, but to be used against military objectives, such as armoured vehicles, aircraft and installations or facilities.

2. 'Concentration of civilians' means any concentration of civilians, be it permanent or temporary, such as in inhabited parts of cities, or inhabited towns or villages, or as in camps or columns of refugees or evacuees, or groups of nomads.

3. 'Military objective' means, so far as objects are concerned, any object which by its nature, location, purpose or use makes an effective contribution to military action and whose total or partial destruction, capture or neutralization, in the circumstances ruling at the time, offers a definite military advantage.

4. 'Civilian objects' are all objects which are not military objectives as defined in paragraph 3.

5. 'Feasible precautions' are those precautions which are practicable or practically

possible taking into account all circumstances ruling at the time, including humanitarian and military considerations.

Article 2
Protection of civilians and civilian objects

1. It is prohibited in all circumstances to make the civilian population as such, individual civilians or civilian objects the object of attack by incendiary weapons.
2. It is prohibited in all circumstances to make any military objective located within a concentration of civilians the object of attack by air-delivered incendiary weapons.
3. It is further prohibited to make any military objective located within a concentration of civilians the object of attack by means of incendiary weapons other than air-delivered incendiary weapons, except when such military objective is clearly separated from the concentration of civilians and all feasible precautions are taken with a view to limiting the incendiary effects to the military objective and to avoiding, and in any event to minimizing, incidental loss of civilian life, injury to civilians and damage to civilian objects.
4. It is prohibited to make forests or other kinds of plant cover the object of attack by incendiary weapons except when such natural elements are used to cover, conceal or camouflage combatants or other military objectives, or are themselves military objectives.

Note

[1] Vedi Allegato 1.

[2] Vedi Allegato 2.

[3] Vedi http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/wp.htm.

[4] Sito indicato nella nota 3.

[5] Independent.co.uk Online Edition, http://www.independent.co.uk/: 'US forces used 'chemical weapons' in Iraq', 16 novembre 2005; 'Incendiary weapons: The big white lie', 18 novembre 2005.

[6] «Il Professor Paul Rodgers, del Dipartimento di Studi sulla Pace, Università di Bradford, [...] ha affermato: *Il fosforo bianco sarebbe considerato, in base alle convenzioni internazionali, come arma chimica se 'deliberatamente impiegato contro persone al fine di ottenere un effetto chimico'*».

[7] Per la trad. it. vedi nota precedente.

[8] «Non è considerato nella convenzione sulle armi chimiche nel suo normale impiego ma, benché sia materia di sottigliezze legali, rientra probabilmente nella categoria delle armi chimiche se usato per questo tipo di scopo direttamente contro persone.»

[9] La Convenzione sulle Armi Chimiche è monitorata dall'Organizzazione per la Proibizione delle Armi Chimiche, con sedea L'Aia. Al suo portavoce Peter Kaiser è stato chiesto se il fosforo bianco era messo al bando dalla Convenzione e Kaiser ha così risposto: 'No, non è proibito dalla Convenzione se impiegato nel contesto di un'applicazione militare che non comporta nè intende far uso delle proprietà tossiche del fosforo bianco. Il fosforo bianco è normalmente usato per produrre fumo, al fine di camuffare i movimenti. Se questo è lo scopo per cui si impiega il fosforo bianco, allora è considerato, standoalla Convenzione, un uso legittimo. Se invece le proprietà tossiche del fosforo bianco, cioè le proprietà caustiche, sono specificamente intese per esser usate come arma, questo è ovviamente proibito, perchè in base al modo in cui la Convenzione è strutturata o è di fatto applicata, qualsiasi sostanza chimica usata contro esseri umani o animali che causi danni o uccida per mezzo delle sue proprietà tossiche è considerata arma chimica'.

[10] «'Scopi non proibiti in base alla Convenzione' significa: c) Scopi militari non connessi con l'impiego delle proprietà tossiche delle sostanze chimiche come metodo di guerra. Commento: Il linguaggio statutario preso su a modello deriva direttamente dalla Convenzione, Articolo II (9). È inteso delineare l'ambito di ciò che non è proibito dalla Convenzione per quanto concerne sviluppo, produzione, stoccaggio e uso di sostanze chimiche, incluse quelle tossiche. [...] Il linguaggio usato nel sottoparagrafo (c) è accuratamente scelto. Le sostanze chimiche possono essere impiegate a scopi militari, anche come armi, nella misura in cui l'effetto predominante dell'uso dell'arma non sia la tossicità nei confronti di esseri umani e animali. Per esempio, i carburanti dei missili, alcuni dei quali sono sostanze chimiche tossiche, possono essere usati nelle armi perché il loro impiego militare non dipende dalle proprietà tossiche del carburante».

[11] Il testo può essere preso ad esempio da http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/int/index.html

Chimica e ambiente

Riccardo Basosi

Dipartimento di Chimica e Centro di Studio dei Sistemi Complessi, Università di Siena

Introduzione

Le reazioni chimiche cui dobbiamo gran parte delle condizioni di benessere della nostra vita di ogni giorno sono anche alla base della diffusa preoccupazione sui cambiamenti climatici e gli effetti catastrofici del riscaldamento globale. Questo tema oggi è discusso dagli scienziati, ma anche dalla stampa quotidiana e dalla gente comune. È quindi particolarmente necessario che l'argomento sia divulgato rispettando i canoni di una corretta informazione scientifica per contrastare da una parte gli atteggiamenti irrazionali contro la scienza e incoraggiare dall'altra la maturazione della consapevolezza che l'ambiente in cui viviamo è limitato, delicato e soggetto, come tutti i sistemi complessi, a meccanismi di feed-back che ne possono alterare irreversibilmente le caratteristiche [6]. Se non ci fosse l'«effetto serra» la vita sulla terra non sarebbe possibile, ma perché un eccesso di effetto serra potrebbe ottenere lo stesso risultato? Perché l'ozono ha effetti positivi se sta nella stratosfera e invece è così pericoloso vicino a casa nostra? A queste domande, che molti si fanno, si cercherà di rispondere nel prosieguo di questa conferenza[1] limitando per quanto possibile l'eccesso di tecnicismi, ma anche evitando, come suggeriva il grande Feyman di raccontare cose sbagliate solo perché... sono più semplici da capire.

1. L'anidride carbonica (CO_2)

Il biossido di carbonio, o anidride carbonica, è un gas normalmente presente nell'atmosfera che deriva dalla combustione di materiale organico, in presenza di sufficienti concentrazioni di ossigeno. La CO_2 viene inoltre prodotta da numerosi microrganismi attraverso la fermentazione e la respirazione cellulare. Le piante utilizzano la CO_2 durante la fotosintesi, usando sia il carbonio che l'ossigeno per costruire i carboidrati. Inoltre rilasciando ossigeno nell'atmosfera, e mettendolo a disposizione per la respirazione di organismi eterotrofi, formano a tutti gli effetti un ciclo [7].

Stando ai dati relativi all'anno 2004, la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera terrestre risulta essere lo 0.038% in volume o lo 0.053% in peso. Ciò significa una quantità di CO_2 di circa 2771012 tonnellate. A causa della maggiore superficie terrestre, e quindi di vegetazione, nell'emisfero settentrionale, confrontato con quello meridionale, esiste una fluttuazione di circa 5 ppm, con un massimo in maggio e un minimo in ottobre. Nonostante la sua modesta concentrazione, la CO_2 è una componente fondamentale dell'atmosfera terrestre.

L'atmosfera e la superficie terrestre vengono riscaldate dall'energia proveniente dal Sole. Della radiazione solare complessiva entrante, circa il 50% raggiunge la superficie, da cui viene assorbita; un altro 20% viene assorbito dai gas presenti nell'atmosfera e dalle gocce di acqua presenti. Il restante 30% non viene assorbito, ma riflesso verso lo spazio dalle nubi, dalle superfici innevate e ghiacciate, dalle distese di sabbia e da altri corpi riflettenti. La Terra emette energia, come un qualsiasi corpo caldo, e in particolare, affinché la temperatura rimanga costante, l'energia emessa deve essere uguale a quella assorbita. I principali costituenti dell'atmosfera, N_2, O_2 e Ar, non sono in grado di assorbire le radiazioni infrarosse. I gas presenti nell'atmosfera che sono causa della maggior parte del riscaldamento imputabile all'effetto serra sono il vapore acqueo e il biossido di carbonio.

La luce viene assorbita in modo più completo quando la sua frequenza è la stessa di quella di un moto interno alle molecole con cui questa interagisce. Un ulteriore aumento nella concentrazione di CO_2 nell'atmosfera impedisce ad una quantità maggiore di radiazione IR di sfuggire nello spazio, con il risultato di un maggiore riscaldamento dell'aria.

In primavera ed estate grandi quantità di CO_2 sono eliminate dall'aria per effetto della fotosintesi clorofilliana delle piante: la cellulosa (CH_2O) delle fibre vegetali incorpora in questa forma polimerica la CO_2 che non contribuisce quindi più all'effetto serra. Il carbonio delle piante viene detto 'carbonio fissato'. Durante la decomposizione biologica dei tessuti vegetali, che avviene soprattutto in autunno e in inverno, il biossido di carbonio precedentemente utilizzato viene restituito.

Si sospetta che la velocità della fotosintesi aumenti all'aumentare del livello di CO_2 e della temperatura dell'aria e che la formazione di una massa maggiore di carbonio fissato rappresenti un'importante forma di deposito di questo gas. In effetti, l'aumento della biomassa delle foreste delle zone nordiche temperate potrebbe rappresentare la forma più efficiente di diminuzione ciclica della concentrazione di CO_2. Infatti le immissioni di CO_2 collegate alle attività umane rappresentano solo il 4% della totalità del gas prodotto in natura; perciò piccole variazioni dell'efficienza di fissazione del biossido di carbonio nella biomassa possono avere effetti rilevanti sulla quantità di CO_2 residua che si accumula nell'atmosfera.

Gran parte dell'aumento esponenziale della concentrazione atmosferica della CO_2 dovuta alle emissioni antropiche è imputabile alla combustione dei combustibili fossili come carbone, petrolio e gas naturale. Ogni singola persona dei paesi industrializzati è responsabile mediamente dell'emissione annua di 5 tonnellate di CO_2 proveniente da combustibili fossili. Parte di queste emissioni sono dirette (gas di scarico di automezzi e scarichi di gas da riscaldamento) e parte indirette (emissioni connesse alle attività di produzione e trasporto, riscaldamento e climatizzazione, produzione e raffinazione di petrolio).

L'emissione annua per persona di CO_2 nei paesi in via di sviluppo è pari ad un decimo di quella dei paesi industrializzati, ma in costante aumento. Una quantità significativa

di biossido di carbonio raggiunge l'atmosfera anche a causa della deforestazione, realizzata tramite incendi per ottenere nuovi terreni agricoli. Attualmente il paese in cui la deforestazione, in termini assoluti, è più rilevante è il Brasile; tuttavia il primato dell'aumento della deforestazione spetta al Sud-Est asiatico (1,6%) e all'America centrale (1,5%), piuttosto che all'America Meridionale (0,6%). Comunque, nonostante le operazioni di deforestazione, la quantità totale di carbonio contenuto nelle foreste dell'Emisfero Nord appare in aumento, sebbene questo aumento non sia sufficiente a compensare le perdite nel resto del mondo.

Nel complesso si può calcolare che la deforestazione sia responsabile di circa un quarto delle emissioni attuali di CO_2 legate alle attività umane; gli altri tre quarti derivano dall'uso dei combustibili fossili.

Circa metà delle emissioni di CO_2 legate alle attività umane trovano un deposito naturale sciogliendosi nell'acqua di mare. Tuttavia, le acque marine più superficiali si mescolano molto lentamente con quelle più profonde; quindi occorrono centinaia di anni perché il biossido di carbonio disciolto nelle acque superficiali penetri nelle profondità degli oceani depositandosi sui fondali come carbonato di calcio insolubile. Di conseguenza, sebbene gli oceani finiscano per sciogliere gran parte dell'eccesso di CO_2 dell'aria, la scala dei tempi del processo è molto grande, per cui il gas in eccesso si accumula nell'atmosfera. Una singola molecola di biossido di carbonio rimane mediamente nell'atmosfera per più di cento anni. Inoltre, la capacità degli strati più superficiali degli oceani di assorbire biossido di carbonio diminuisce se l'acqua si riscalda in misura apprezzabile, dato che la solubilità dei gas nell'acqua diminuisce all'aumentare della temperatura.

Gli ossidi di carbonio sono composti generalmente piuttosto stabili tanto che le uniche reazioni, a parte quelle già citate con i mari e la vegetazione, avvengono a livello della troposfera e sono essenzialmente limitate alla conversione di CO in CO_2, grazie alla azione di radicali perossidrilici e idrossilici formatisi da reazioni fitochimiche.

Il bilancio energetico della Terra e dell'atmosfera determina la temperatura globale media in superficie. La superficie terrestre trasferisce all'atmosfera in media tanta energia quanta ne assorbe; il valore della temperatura globale media in superficie (circa 15 °C) è quello necessario per mantenere la Terra e l'atmosfera in equilibrio termico. Se la Terra fosse priva di atmosfera la sua temperatura, in virtù della quantità della radiazione emessa dal Sole e della distanza da esso, avrebbe una temperatura media di meno 15 °C. L'atmosfera è infatti relativamente trasparente alle radiazioni di lunghezze d'onda del visibile, che corrispondono al massimo dello spettro di emissione solare, e relativamente opaca alle radiazioni infrarosse. Di tale opacità sono responsabili i gas serra e in primo luogo la CO_2 che quindi in quantità adeguate svolge un ruolo positivo.

La temperatura media attuale permette l'esistenza dell'acqua nei tre stati fisici: liquida, aeriforme e solida e si ha evidenza scientifica che l'equilibrio termico che consente all'acqua di esistere in questi tre stati risale a più di 3,8 miliardi di anni.

Si pensa quindi che operi un meccanismo di regolazione del contenuto della CO_2

nell'atmosfera che agisce con meccanismi di retroazione negativa (feedback) e mantiene la situazione in uno stato semistazionario. I cicli geochimici dei carbonati e dei silicati operano su una scala temporale superiore ai 500.000 anni.

Gran parte dell'anidride carbonica in eccesso finisce in mare sotto forma di bicarbonato che gli organismi marini potranno poi utilizzare per costruire i loro gusci e scheletri carbonatici, destinati a venire incorporati nei sedimenti alla loro morte. Pertanto nel corso della precipitazione chimica, e soprattutto biochimica, in mare verrebbe nuovamente liberata l'anidride carbonica proveniente dalle rocce carbonatiche sui continenti. In definitiva, in questo caso si tratterebbe solo di un trasferimento di CO_2 dall'atmosfera agli oceani. Invece solo la metà di quella utilizzata per l'idrolisi dei silicati di calcio viene restituita: l'altra metà viene incorporata nei carbonati che si formano in mare nella reazione che fa seguito alla reazione tra silicati e anidride carbonica.

Si parte infatti da due molecole di CO_2 iniziali, e se ne riottiene solo una. Un abbassamento di temperatura invece rallenta la sottrazione di CO_2 dall'atmosfera e quindi tenderebbe a far aumentare l'effetto serra. La CO_2 viene liberata in atmosfera anche attraverso le eruzioni vulcaniche. Al suo ciclo partecipano anche gli organismi attraverso i processi di respirazione, fotosintesi e accumulo di sostanza organica derivante da microrganismi sotto forma di petrolio e carbone. Se si verificasse per cause imponderabili un leggero aumento di CO_2 nell'atmosfera, la temperatura superficiale aumenterebbe di poco, il clima si farebbe più umido per la maggiore evaporazione degli oceani, e ciò comporterebbe un maggiore trasferimento di CO_2 dagli oceani all'atmosfera perché diminuisce la solubilità della CO_2 (feedback positivo). Nell'insieme si creano condizioni ideali per un incremento della crescita della vegetazione, in grado di assorbire temporaneamente e velocemente buona parte dell'anidride carbonica in eccesso. Un raddoppio del tenore di CO_2, porterebbe alcune piante, come la patata, ad aumentare la loro produttività fino al 50%; per altre, come il mais, solo del 10%.

Con l'inizio della rivoluzione industriale, la concentrazione atmosferica della CO_2 è aumentata di circa il 40%, con la maggior parte rilasciata dopo il 1945. Le misurazioni mensili effettuate a partire dal 1958, mostrano un incremento da 316 a 376 ppm nel 2003, un aumento globale di 60 ppm durante i 44 anni di misurazioni. L'incremento di CO_2 di natura antropica è principalmente dovuto alla combustione di carburanti fossili, come carbone e petrolio, e come già detto, alla deforestazione.

La Global Warming Theory (GWT) predice che l'incremento della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera tende ad innalzare l'Effetto Serra e quindi contribuisce al riscaldamento globale. L'effetto del biossido di carbonio, prodotto dalla combustione sul clima è chiamato «Effetto Callendar».

Il metodo più diretto per misurare le concentrazioni atmosferiche di biossido di carbonio per periodi precedenti al campionamento diretto, consiste nel misurare le bolle di aria, dette «*gas inclusions*», intrappolate nei ghiacci polari. Uno degli studi più significativi mostra che il livello di CO_2 nei ghiacci antartici corrisponde a circa 260-

280 ppm per i periodi immediatamente precedenti alle emissioni industriali, e questo valore non varia molto durante i precedenti 10000 anni.

Lo strato di ghiaccio prelevato a maggiore profondità proviene da Vostok, in Antartide, dove il campione è stato estratto a 3600 metri di profondità, e corrisponde all'aria di 420000 anni fa. Durante questo periodo, la concentrazione atmosferica di CO_2 variava tra 180-210 ppm durante le ere glaciali, aumentando sino a 280-300 ppm nei periodi interglaciali.

Sebbene le concentrazioni contemporanee di CO_2 siano state superate talvolta durante le epoche geologiche precedenti, i livelli attuali di biossido di carbonio sono più elevati di qualsiasi altro valore negli ultimi 20 milioni di anni.

I combustibili fossili sono differenti l'uno dall'altro per quanto riguarda la quantità di gas emesso per unità di energia prodotta. In buona approssimazione, la quantità di calore emesso dalla combustione di una sostanza a base di carbonio è direttamente proporzionale alla quantità di ossigeno consumata. Il gas naturale genera meno biossido carbonio del petrolio e del carbone. A parità di peso il potenziale di un combustibile fossile di generare CO_2 e quindi di contribuire al riscaldamento dell'atmosfera dipende dal suo contenuto di carbonio; dunque come disincentivo all'uso di combustibili più inquinanti, dovrebbero essere istituite tasse sul carbonio, cioè tasse basate sulla quantità di carbonio contenuta in un combustibile piuttosto che nella sua massa totale.

Nel futuro, il biossido di carbonio contenuto nei gas di scarico delle centrali elettriche alimentate a combustibili fossili potrebbe essere allontanato chimicamente anziché immesso nell'atmosfera. Il biossido di carbonio così recuperato potrebbe essere collocato nel fondo degli oceani dove può sciogliersi, oppure nelle cavità sotterranee che in precedenza ospitavano i giacimenti di petrolio o di gas naturale. In prossimità del fondo marino, il biossido di carbonio potrebbe reagire con il carbonato di calcio delle rocce formato dai depositi delle conchiglie dei molluschi marini, producendo bicarbonato di calcio solubile. Ai fini pratici, il CO_2 sotto forma di bicarbonato, rimarrebbe in soluzione per un tempo indeterminato.

Il protocollo di Kyoto dice che le Parti dovranno, individualmente o congiuntamente, assicurare che le emissioni antropogeniche globali siano ridotte di almeno il 5% rispetto ai livelli del 1990 nel periodo di adempimento 2008-2012. Per il raggiungimento di questi obiettivi, i Paesi possono servirsi di diversi strumenti che intervengono sui livelli di emissioni di gas a livello locale-nazionale oppure transnazionale. Nell'ampio ventaglio di strumenti, ne vengono espressamente indicati tre, tutti appartenenti alle cosiddette misure di flessibilità: queste misure sono l'Emission trading (una misura consistente nella creazione di un mercato dei permessi di emissione), la Joint Implementation (una misura che prevede la collaborazione tra Paesi sviluppati e che consente a un Paese di ottenere dei crediti di emissione grazie a dei progetti di riduzione delle emissioni oppure di assorbimento delle emissioni di gas a effetto serra sviluppati in un altro Paese), e il Clean Development Mechanism (uno strumento analogo alla precedente, ma che si differenzia da questa in quanto coinvolge paesi in via di sviluppo).

Un aumento della temperatura media dell'atmosfera significa un contenuto maggiore di energia nell'aria e nell'acqua alla superficie terrestre con conseguenti effetti molto marcati sul clima. Recenti studi dell'IPCC [2] mostrano come un aumento planetario della temperatura conduca a più frequenti e violente perturbazioni tropicali, compresi gli uragani. Inoltre un riscaldamento dell'atmosfera comporta il graduale scioglimento sia delle calotte polari che dei ghiacciai continentali, con il conseguente aumento del livello degli oceani. Paradossalmente si prevede che un aumento della concentrazione dei gas responsabili dell'effetto serra possa causare un raffreddamento della stratosfera.

Il sommarsi dei contributi all'effetto serra dovuti all'aumento della concentrazione dei vari gas produce un danno quantitativamente simile a quello causato dal biossido di carbonio. Per riassumere gli effetti sull'aumento di tutti i gas serra esprimendoli con un solo dato numerico è stato introdotto il concetto di concentrazione equivalente di biossido di carbonio. In questa scala viene preso in considerazione l'aumento della concentrazione di tutti i gas serra, eccetto il biossido di carbonio, verificatosi dall'era preindustriale e viene calcolato il cambiamento globale della temperatura che ne sarebbe dovuto conseguire; da ciò viene dedotta la variazione di concentrazione imputabile al solo CO_2, responsabile dell'aumento della temperatura. La somma della concentrazione attuale del biossido di carbonio e di quella equivalente fornisce il valore della concentrazione equivalente di CO_2. Tale valore attualmente è di poco superiore a 400 ppm. Se la tendenza attuale dovesse continuare entro il 2025 la concentrazione equivalente di CO_2 raggiungerebbe un valore doppio rispetto a quello di 280 ppm dell'epoca preindustriale, sebbene il valore relativo al solo CO_2 non arrivi a raddoppiare prima del 2100 circa.

2. Il metano (CH_4)

Il metano è la molecola organica in cui il carbonio è allo stato di ossidazione più ridotto possibile; la sua reattività nell'atmosfera è bassa, a causa della sua stabilità, ma risulta legata alle eccitazioni elettroniche; il grado di ossidazione fa sì che il metano sia una facile "preda" della nostra atmosfera, che è un ambiente altamente ossidante. È sulla base di questo che si sviluppa tutta la sua reattività. Anche il metano è un gas serra; la sua permanenza nell'atmosfera è vitale per il mite clima terrestre, l'aumento della sua concentrazione, a causa di qualunque manomissione dei cicli biogeochimici, porta inevitabilmente a cambiamenti climatici che possono stravolgere l'esistenza della vita sulla Terra. Pur rappresentando un problema per l'effetto serra in base al suo Potenziale di Riscaldamento Globale, ha emissioni minori in confronto a quelle dell'anidride carbonica. Il problema risiede, semmai, nelle reazioni che il metano dà nell'atmosfera, soprattutto nella troposfera: per reazione con radicali ossidrile, il metano inizia una catena di processi che liberano, alla fine, anidride carbonica e vapor acqueo, due potentissimi gas serra. Da notare che il vapor acqueo, pur non essendo chimicamente pericoloso, contribuisce fisicamente al riscaldamento globale, che porta a maggiori evaporazioni, in un ciclo continuo di feedback positivo per il riscaldamento stesso.

È per questi motivi che il metano deve essere tenuto sotto stretto controllo, perché regola numerosi ed importanti processi del mondo vivente e, in gran parte, il clima globale. Lo sfruttamento del gas emesso da masse organiche in putrefazione, siano esse rifiuti urbani, compost o resti di animali, rappresenta un uso migliore di emissioni naturali di metano, che andrebbero nell'atmosfera ad aumentare l'effetto serra. In questo modo, invece, si emette anidride carbonica, ma dopo aver usato il potere calorifico del metano, ed impedendo la generazione di altri ioni ossidrile e la degradazione degli NO_x nell'atmosfera. Il compost usato per ottenere il biogas è comunque ottimo per la concimazione. Il metano come gas serra pone problematiche differenti da quelle della CO_2. L'atmosfera terrestre possiede meccanismi naturali che le permettono di mitigare la sua temperatura, secondo strati termici, per cui parte della radiazione solare in entrata è usata per scaldare l'aria, favorire la fotosintesi, proteggere la vita da radiazioni dannose. La radiazione UV, filtrata dallo strato di ozono, rimane soprattutto all'esterno a scaldare la parte alta della Stratosfera.

La manifestazione fisiologica dell'Effetto Serra è vitale e la sua destabilizzazione può divenire molto pericolosa. Se, come sta succedendo, la concentrazione dei gas che assorbono nell'IR termico aumenta, l'atmosfera si surriscalda, anche di qualche grado centigrado, sconvolgendo il clima globale. Nella storia ci sono state varie fasi climatiche, più calde o più fredde di quella che stiamo vivendo ma l'aumento che sta avvenendo in questi anni ha una crescita mai osservata, ed è dovuto alla manipolazione dei cicli biogeochimici della biosfera da parte delle attività umane.

I gas 'climalteranti' sono: biossido di carbonio, metano, vapor acqueo, protossido di azoto, perfluorocarburi, idrofluorocarburi, esafloruro di zolfo, CFC, CO, NO_x.

Il metano è il terzo gas serra in ordine di importanza, dopo la CO_2 ed il vapor acqueo. Mentre per la molecola di acqua e per quella di anidride carbonica le energie di movimento dei legami sono entro la regione dell'infrarosso, per il metano le vibrazioni dei legami C—H cadono fuori dell'infrarosso termico. Questo è il motivo per cui il metano assorbe nella regione dell'infrarosso, ossia quella corrispondente alla maggior parte della radiazione di ritorno emessa dalla Terra. L'aumento del metano presente nell'aria ha un effetto serra 23 volte maggiore di quello della CO_2, ma la velocità attuale di aumento nell'atmosfera è 80 volte maggiore per la CO_2; ne deriva che il metano è meno importante nelle problematiche dell'effetto serra, rispetto alla CO_2, ma non per questo è da sottovalutare. Si ritiene che il surriscaldamento planetario dovuto al CH_4 sia un terzo rispetto a quello dovuto alla CO_2. La concentrazione atmosferica del metano ha raggiunto un valore quasi doppio rispetto a quello del diciottesimo secolo; e la maggior parte di tale aumento è avvenuta nel ventesimo secolo.

Le cause dell'aumento di CH_4 nell'atmosfera sono attribuibili ad attività umane quali l'aumento della produzione di cibo, l'uso dei combustibili fossili e la deforestazione. In natura, la decomposizione anaerobica della materia organica produce metano; questi processi si verificano maggiormente, e su scala più ampia, nei luoghi di decomposizione dei vegetali coperti dalle acque (zone umide naturali, risaie). Le zone umide vengono

considerate la fonte principale di immissione di CH_4 nell'atmosfera. Negli ultimi decenni le zone umide sono andate estendendosi a causa dell'allagamento di vasti territori per produrre energia idroelettrica. Il metano viene anche prodotto durante la digestione gastrica di erbivori ruminanti (soprattutto bovini e ovini), ogni qualvolta viene digerita la cellulosa. Si calcola che il metano prodotto dai processi vitali dei ruminanti rappresenti circa il 17% del totale.

La decomposizione anaerobica di materia organica nelle discariche è un'altra fonte di metano collegata alle attività umane; in alcuni casi, dove la tecnologia lo permette, tali emissioni sono riusate per produrre energia elettrica o termica.. La combustione di biomassa nelle aree tropicali e subtropicali libera CH_4 in quantità dell'1% rispetto alla massa iniziale di carbonio, a cui deve però essere sommato CO. I contributi di ognuna di queste fonti di metano non sono ben quantificati anche perché la combustione di biomassa è prevalente in paesi non sviluppati raramente dotati di efficienti sistemi di controllo.

I rifiuti solidi urbani sono costituiti per un considerevole frazione da sostanze organiche (scarti alimentari, carta, ecc.), tali sostanze sono naturalmente soggette ad un processo di decomposizione a mezzo di particolari microrganismi presenti nei rifiuti stessi. I procedimenti di degradazione dell'ammasso dei rifiuti possono avvenire in condizioni di presenza dell'ossigeno contenuto nell'aria (fermentazione aerobica) ovvero in assenza o forte limitazione di ossigeno (fermentazione anaerobica). Negli ammassi di rifiuti conferiti in discarica si innesca inizialmente la fermentazione aerobica, la quale avviene con un grande sviluppo di anidride carbonica (CO_2), successivamente, quando l'ossigeno inglobato nel rifiuto ha raggiunto valori trascurabili, si attiva la fermentazione anaerobica, nel corso della quale si forma una miscela gassosa costituita essenzialmente da metano (CH_4), in percentuale variabile dal 40 al 50% in volume, anidride carbonica (CO_2), 35 - 40% in volume della miscela, e piccole quantità di altri gas come acido solfidrico (H_2S), idrogeno (H_2), azoto (N_2) e composti in tracce, responsabili della formazione degli odori sgradevoli, quali mercaptani, ammoniaca, composti alogenati, ecc.

La produzione del biogas all'interno del corpo di una discarica è influenzata da un numero notevole di fattori, quali parametri ambientali (precipitazione, temperatura, ecc.) caratteristiche dei rifiuti (composizione, umidità, pretrattamenti subiti, ecc.) ed infine dalle modalità gestionali della discarica (profondità dello scarico controllato, pretrattamenti, ecc.). Parimenti, la composizione chimica analitica del biogas è variabile e fortemente dipendente da quella dei rifiuti di partenza, tuttavia i componenti principali della miscela sono generalmente quelli sopra menzionati. Insetti ed altri animali sono tipicamente gli agenti principali della decomposizione.

Un contributo di cui si deve tenere conto in maniera sempre maggiore, deriva dalla liberazione, tramite il disgelo, di CH_4 intrappolato nel permafrost alle estreme latitudini settentrionali. Questo accumulo di gas deriva dalla decomposizione di vegetali di migliaia di anni fa. Il tempo medio di vita di CH_4 nell'atmosfera è di circa

15 anni; una parte del gas rimanente va invece a finire nella stratosfera o reagisce vicino alla superficie terrestre producendo vapor acqueo atmosferico. In sostanza, circa un quarto del riscaldamento planetario causato dal metano avviene indirettamente come effetto dell'aumento del contenuto di vapor acqueo nell'atmosfera.

L'aumento della concentrazione di metano nell'atmosfera provoca un feedback sull'effetto serra; infatti, l'aumento delle temperature aumenta il disgelo del permafrost e l'accelerazione delle reazioni di decomposizione anaerobica. Questi processi a loro volta conducono ad un aumento delle emissioni di CH_4.

Oltre al metano intrappolato nel permafrost, ve ne sono grandi quantità contenute nelle profondità marine, sotto forma di clatrati idrati di metano, $CH_4 \cdot 6\ H_2O$: una sostanza con struttura cristallina tridimensionale, ingabbiata in molecole di acqua solida, che si forma alle alte pressioni delle profondità marine. Il riscaldamento delle profondità marine, dovuto all'effetto serra, potrebbe sciogliere queste strutture e liberare altro metano.

Riassumendo, per il 17% le emissioni globali di metano provengono da processi di digestione animali (circa 600 litri al giorno per ogni vacca). Il 20% proviene dai processi di estrazione del gas stesso, il 23% dalle zone umide e putrescenti, il resto dal mantello terrestre (reazioni ad alte temperature e pressioni negli strati di rocce metamorfiche in trasformazione, soprattutto scisti, e per «serpentinizzazione» delle peridotidi) e da decomposizioni anaerobiche (batteri nelle piantagioni di riso etc.). Il 60% delle emissioni in totale è legato ad attività umane, soprattutto all'agricoltura e all'allevamento.

Il metano prende parte a moltissime altre reazioni atmosferiche; svolge un ruolo importante nella chimica dello strato di ozono, in quanto può reagire con i radicali cloruro inserendosi in tutta la serie di reazioni generate dal cloro. Ciò che più lega il metano allo strato di ozono e alla chimica della troposfera, è la reattività nel generare ioni ossidrile e al reagire con gli stessi. Innanzitutto, l'ozono troposferico reagisce con il vapor acqueo per generare ioni ossidrile: è anche per questo che l'ozono alle basse altitudini è dannoso. Molti inquinanti atmosferici, spesso in tracce, reagendo con l'ossidrile, si ossidano (praticamente tutti i gas eccetto HCl). Nel nostro caso inizializza e catalizza la reazione di combustione del metano a CO_2 e vapor d'acqua.

3. Gli ossidi di azoto (NO_x)

L'azoto a causa dei suoi vari stati di ossidazione può formare con l'ossigeno sette diversi ossidi. Di questi, soltanto il protossido di azoto (N_2O), il monossido (NO) e il biossido (NO_2) si trovano in concentrazioni misurabili nell'atmosfera [1].

La loro diffusione nell'atmosfera si deve a fonti naturali e antropiche. Tra le prime emerge l'attività microbica, in particolare la denitrificazione, che è una attività che utilizza nitrati come accettori terminali di elettroni; essa è realizzata da diversi gruppi di microrganismi, tra cui funghi e batteri sia autotrofi che eterotrofi, sia aerobi che anaerobi, in ambienti diversi indipendentemente dalla reazione del terreno. Inoltre, la

sintesi di NO_X può avvenire ad opera delle scariche elettriche a partire dalle molecole di ossigeno e azoto presenti nell'aria.

La produzione globale di NO_X da fonti naturali è certamente elevata (da 4,5 a 15 volte superiore a quella di origine antropica),ma la localizzazione in aree ridotte delle emissioni prodotte dall'uomo, che portano a concentrazioni elevate di NO_X finisce con il giocare un ruolo determinante. Le attività antropiche principali fonti di NO_X sono al 49% i motori dei veicoli, al 27% centrali elettriche, al 19% i settori industriali,commerciali e residenziali ed infine al 5% tutte le altre sorgenti.

La maggior parte degli ossidi di azoto di origine non naturale deriva dalla reazione tra N_2 e O_2 dell'aria nel corso della combustione. Com'è noto, l'aria è composta approssimativamente per il 78% in volume da azoto e per il 21% da ossigeno; a temperatura ambiente questi gas sono presenti in forma molecolare e hanno scarsissima tendenza a reagire tra loro. L'intervento di condizioni tali da cedere sufficiente energia alla miscela gassosa ne provoca la dissociazione, innescando interazioni chimiche.

Poiché temperature come quelle necessarie per innescare le reazioni sono comunemente raggiunte durante molti processi di combustione implicanti aria, questa operazione è una importantissima fonte di NO_X. Si può infatti considerare che questa reazione sia una reazione collaterale di tutti i processi di combustione, compresi quelli dei motori endotermici (in particolare a benzina), ma soprattutto degli impianti fissi (riscaldamento domestico, centrali termoelettriche…), indipendentemente dalla combustione e qualità dei combustibili utilizzati.

Una volta immessi nell'atmosfera, l'NO (insolubile) può essere ossidato a NO_2, oppure ridotto dalla luce ad azoto molecolare N_2, mentre l'NO_2 è rimosso principalmente dalle precipitazioni, soprattutto come acido nitrico. I meccanismi che portano alla formazione di HNO_3 a partire dagli ossidi di azoto sono però ancora oggetto di studio, e sembra che le reazioni avvengano in presenza di O_3 (ozono).

Il tempo di permanenza medio degli NO_X nell'atmosfera non risulta superare i 3-4 giorni; in aree altamente inquinate, essi raggiungono concentrazioni di alcune decine di ppb.

La distruzione catalitica dell'ozono si può verificare anche in una atmosfera pulita poiché piccole quantità di catalizzatori sono sempre presenti nella stratosfera. Ovviamente le conseguenze sono ancora più gravi se queste specie sono emesse anche dalle attività antropiche. Un esempio è la molecola dell'ossido di azoto, NO*, prodotta quando l'ossido nitroso sale dalla troposfera alla stratosfera, dove le sue molecole possono collidere con atomi di ossigeno eccitati prodotti dalla decomposizione fotochimica dell'ozono.

È questa una delle cause dell'assottigliamento dello strato di ozono, perché si è alterato un equilibrio naturale. Si può ignorare la possibilità che l'NO* prodotto nella troposfera migri verso la stratosfera poiché il gas viene efficacemente ossidato ad acido nitrico e facilmente allontanato dall'aria essendo solubile nell'acqua della pioggia.

In molte aree urbane si verificano episodi di inquinamento atmosferico in cui

vengono raggiunti valori relativamente elevati di concentrazione a livello del suolo dell'ozono, in conseguenza di reazioni fotochimiche a carico di inquinanti come gli ossidi di Azoto. Questo fenomeno è detto «smog fotochimico» ed è caratterizzato dalla presenza dell'ozono nel posto sbagliato. Il processo attraverso cui si forma lo smog implica centinaia di reazioni diverse che avvengono contemporaneamente e a cui partecipano dozzine di prodotti chimici.

Molti paesi hanno stabilito un limite di circa 100 ppb per la quantità massima di ozono consentito nell'aria. I principali prodotti che innescano lo smog fotochimico sono l'ossido di azoto e molecole organiche incombuste, soprattutto idrocarburi emessi nell'aria come inquinanti dagli scarichi dei veicoli (indicati con COV). Altro ingrediente fondamentale dello smog fotochimico è la luce solare, che aumenta la concentrazione dei radicali liberi che partecipano ai processi chimici di formazione dello smog. I prodotti finali dello smog sono ozono, acido nitrico, composti organici parzialmente ossidati e, in alcuni casi, nitrati.

Le sostanze come NO*, idrocarburi e altri COV emessi inizialmente nell'aria sono detti inquinanti primari, mentre i prodotti, quali O_3 e HNO_3, in cui essi si trasformano, sono detti inquinanti secondari. I più reattivi tra i COV presenti nell'aria della città sono gli idrocarburi contenenti un doppio legame C=C in quanto tali composti possono generare radicali liberi. Anche altri idrocarburi sono presenti e possono reagire, ma la velocità delle loro reazioni è modesta anche se queste sostanze possono divenire importanti nelle fasi più avanzate degli episodi di smog fotochimico.

Si è visto che in una città, affinché si verifichi lo smog fotochimico, devono essere presenti numerose condizioni; in primo luogo, il traffico dei veicoli deve essere intenso perché possano essere emesse ed accumularsi nell'aria quantità sufficienti di NO*, idrocarburi e altri COV. In secondo luogo, deve essere presente un clima caldo e una intensa irradiazione solare perché possano procedere velocemente le reazioni cruciali, alcune delle quali fotochimiche, per la formazione dello smog. Infine la massa di aria deve rimanere relativamente ferma affinché i reagenti non siano diluiti. Per motivi geografici (per esempio la presenza di montagne) e di densità di popolazione, tutti questi fattori sono presenti in grandi città quali Los Angeles, Denver, Città del Messico, Tokyo, Atene, Roma e altre. Ad esempio, l'aria di Città del Messico è così inquinata dall'ozono e dallo smog, nonché dal piombo proveniente dagli additivi presenti nella benzina, che si stima sia responsabile di migliaia di morti premature ogni anno.

Nelle fasi più avanzate dello smog fotochimico, le reazioni che si verificano tra due radicali non possono più essere considerate trascurabili come avviene nel caso dell'aria non inquinata. Poiché le loro velocità sono proporzionali al prodotto delle concentrazioni dei due radicali, questi processi diventano importanti allorché le concentrazioni dei radicali divengono elevate; in pratica, in queste condizioni tali reazioni si verificano con considerevole velocità.

Queste reazioni rappresentano il principale pozzo dei radicali ossidrile. La vita media di una molecola di HNO_3 è di alcuni giorni; dopo tale tempo essa si è disciolta

nell'acqua ed è ricaduta a terra con le precipitazioni oppure è stata decomposta fotochimicamente nei suoi componenti.

Quando la concentrazione del NO* è elevata, questa specie chimica complessa, come prevedibile, si comporta come un perossiradicale e ossida l'ossido di azoto. Invece, nel pomeriggio, quando la concentrazione del NO* è molto bassa, il radicale va incontro a una reazione radicale-radicale addizionandosi al NO_2* e producendo un nitrato. Nel caso più comune, in cui il gruppo alchilico R è un CH_3, il nitrato prodotto è il perossiacetilnitrato, PAN, un potente agente irritante degli occhi per l'uomo e un veleno per le piante.

Un'altra importante specie chimica che compare nelle fasi più tardive degli episodi di smog è il radicale nitrato, NO_3*, prodotto quando sono contemporaneamente presenti elevate concentrazioni di NO_2* e ozono. Durante il giorno l'NO_3* viene dissociato fotochimicamente a biossido di azoto e ossigeno molecolare con grande velocità, mentre durante la notte è stabile e nelle ore dopo il tramonto svolge un ruolo simile a quello di OH* nella reazione con gli idrocarburi.

Un ossido di azoto presente in tracce nell'atmosfera che contribuisce significativamente all'effetto serra è il protossido di azoto, N_2O, la cui formula di struttura è NNO piuttosto che quella, più simmetrica, NON.

Il N_2O è 270 volte più efficace del CO_2 come causa del riscaldamento planetario. Come quella del metano, anche la concentrazione atmosferica del N_2O è rimasta costante fino a circa 300 anni fa, quando ha cominciato ad aumentare; tuttavia, al presente, il livello di questo gas nell'atmosfera è aumentato solo del 9% ed attualmente sta aumentando ad un tasso annuo dello 0,25%, una velocità di aumento che appare decisamente modesta ma che causerà in meno di 40 anni un aumento della sua concentrazione atmosferica maggiore di quello registrato nei trecento anni precedenti. Le quantità crescenti di protossido di azoto accumulatesi nell'aria a partire dall'epoca preindustriale sono responsabili di circa un terzo dell'aumento di temperatura di cui è ritenuto responsabile il metano. Gran parte della produzione naturale di questo gas deriva dalla sua liberazione dagli oceani, mentre la maggior parte del rimanente è prodotta attraverso processi che si verificano nei terreni delle regioni tropicali. Il gas è un prodotto secondario del processo di denitrificazione biologica in ambiente aerobico e del processo di nitrificazione in ambiente anaerobico.

È stato accertato che la nitrificazione è più importante della denitrificazione come fonte di N_2O a livello planetario. Non esistono pozzi per il protossido di azoto nella troposfera, cosicché tutto questo gas finisce per passare nella stratosfera dove ogni molecola assorbe la luce UV decomponendosi, di solito in N_2 e ossigeno atomico, oppure reagisce con l'ossigeno atomico.

Il biossido di azoto è solubile nei tessuti biologici ed è un ossidante; per questo i suoi effetti sulla salute sono disturbi respiratori delle basse vie aeree. I livelli di NO_x comunemente rinvenibili nell'ambiente sono responsabili di effetti di tipo cronico, di difficilissima valutazione perché assolutamente aspecifici: ritardi di sviluppo, riduzioni

di biomassa e modeste clorosi. Assai difficile è una generalizzazione degli effetti di esposizioni prolungate a basse concentrazioni di ossidi di azoto.

4. Il «buco dell'ozono»

La spedizione britannica in Antartide denunciò nel 1985 che lo strato di ozono sovrastante il Polo Sud si assottigliava ogni anno in settembre-ottobre fin dagli inizi degli anni '70. I dati, poi confermati nel 1991 dal satellite, ebbero il merito di rendere evidente che l'impoverimento era più drastico in corrispondenza delle aree più densamente popolate. Si iniziò a parlare di «buco dell'ozono» [3], [4]. Questa definizione è in realtà un po' esagerata; infatti, in una vastissima area sovrastante una superficie molto più grande del continente antartico, si è verificato un assottigliamento dello strato dell'ozono molto marcato, ma non c'è una distruzione totale come potrebbe far pensare la parola 'buco'. Questo fenomeno è dovuto all'azione concomitante dell'inquinamento e delle particolari condizioni meteorologiche della zona polare. Infatti la circolazione atmosferica sopra la calotta polare e le basse temperature generano ad alte quote le cosiddette nubi stratosferiche polari. Queste sono praticamene isolate dal resto dell'atmosfera e si comportano come un immenso reattore dove anche gli inquinanti si possono accumulare amplificando la portata dei loro effetti.

Per quanto riguarda il problema qui trattato particolare importanza è assunta dalla stratosfera, la fascia che va da 15 a 30 km di altitudine, dove le componenti chimiche sono stratificate a causa della completa assenza di moti convettivi e il relativo rimescolamento si verifica molto lentamente per diffusione. In questa zona, a sua volta suddivisa in vari strati, troviamo il massimo della concentrazione dello strato di ozono ad un'altitudine intorno ai 25 ÷ 30 km.

La composizione chimica media dell'atmosfera è caratterizzata dalla elevata presenza di O_2 (20,9% v/v) e da una bassa concentrazione della CO_2 (350 ppmv). Le frazioni molari di questi due gas sono mantenute in uno stato stazionario, estremamente lontano dallo stato di equilibrio termodinamico, attraverso i due processi metabolici primari della biosfera: fotosintesi e respirazione

La vita ha iniziato a svilupparsi partendo dai microrganismi procarioti anaerobici che, vivendo protetti dalle radiazioni in acque stagnanti o nel suolo, cominciarono approssimativamente 3,5 miliardi di anni fa la produzione biologica di O_2. Questo arrivò ad una concentrazione tale da consentire in seguito lo sviluppo di microrganismi aerobici (1,5-2 miliardi di anni fa) e l'evoluzione dei meccanismi della respirazione e della fotosintesi, i quali dettero un impulso definitivo al raggiungimento dei valori di concentrazione di O_2 che permisero una produzione di O_3 sufficiente a schermare le radiazioni U.V. letali. In questo modo iniziò la migrazione delle specie viventi verso zone superficiali e della graduale colonizzazione delle terre emerse.

La radiazione ultravioletta (h_) derivante dal sole fornisce l'energia necessaria per la formazione di ozono (ossigeno dispari) a partire dalla molecola di ossigeno molecolare O_2. Il processo ha inizio con la formazione di atomi di ossigeno. Dato che all'altitudine

di 30000m la pressione atmosferica è molto bassa, gli atomi di ossigeno tendono a separarsi e a stare a distanze grandi tra loro. La loro ricombinazione diventa quindi un evento raro, ma quando uno di questi atomi incontra una molecola di ossigeno si forma ozono.

La reazione prosegue con un processo ciclico, perché quando una ulteriore radiazione ultravioletta (ad un'altra frequenza) colpisce l'ozono determina la rottura della molecola rigenerando ossigeno molecolare (O_2) ed atomico (O). Se tale processo non è perturbato la quantità di ozono nella nostra atmosfera rimane pressochè costante. La presenza di ozono risulta essenziale per la vita sulla Terra dato che esso assorbe le radiazioni ultraviolette dannose con uno schermo protettivo invisibile.

L'importanza dell'ozono atmosferico è conosciuta da più di 60 anni, ma la ricerca sulla fotochimica di questo costituente si è intensificata negli ultimi due decenni, cioè da quando si è preso coscienza del fatto che l'azione di specie chimiche (anche in tracce) prodotte dall'uomo poteva avere una ripercussione drammatica sul suo bilancio chimico, provocandone una diminuzione della concentrazione soprattutto nella stratosfera.

L'evidenza più importante della distruzione di O_3 nella stratosfera è il cosiddetto buco dell'ozono, cioè la notevole rarefazione di O_3 prodotta nella zona antartica da composti alogenati di origine antropica quali i CFC (clorofluorocarburi) una famiglia di sostanze usate come propellenti negli aereosol e nei compressori frigoriferi [5]. Come l'Ozono, anche questi composti si decompongono per effetto della luce solare e gli atomi di cloro che derivano da questa decomposizione reagiscono con lo strato di Ozono distruggendolo. Il Protocollo di Montreal del 1987 ha imposto una drastica riduzione nella produzione di CFC e nel loro uso anticipando il Protocollo di Kyoto sui climalteranti.

Le equazioni cinetiche delle reazioni fotochimiche che presiedono alla produzione e alla distruzione di O_3 accoppiate con le equazioni che descrivono le proprietà chimico-fisiche e meteorologiche dell'atmosfera, riescono a dare un'interpretazione teorica molto accurata dei dati sperimentali

L'approccio modellistico per la risoluzione dei problemi riguardanti il comportamento delle specie chimiche dell'atmosfera, siano esse naturali o di origine antropica, ha ottenuto dei successi significativi nella comprensione di quali siano i meccanismi della fotochimica dell'O_3 nell'atmosfera, fondamentali per la definizione dei modelli stessi e per capire la relazione tra l'inquinamento atmosferico e l'assottigliamento dello strato dell'ozono.

Reazioni di eliminazione di ossigeno con ossidi di azoto e composti alogenati, erano conosciute già da molto tempo. Ma le bassissime concentrazioni di queste specie a livello stratosferico non riuscivano a spiegare la discrepanza tra i dati teorici e i risultati sperimentali, in quanto le specie in tracce avrebbero dovuto esaurirsi in brevissimo tempo durante il corso della reazione.

A questo problema dettero una spiegazione convincente Bates e Nicolet nel 1950 i quali, sulla base di osservazioni sperimentali ottenute in laboratorio, postularono che

le specie in tracce non partecipavano come reagenti nella reazione di conversione O/O_3 ma piuttosto come catalizzatori. Quindi per spiegare la fotochimica dell'Ozono si doveva ammettere la presenza di una serie di cicli catalitici, basati sui meccanismi radicalici a catena, che guidavano la diminuzione di ossigeno dispari nella stratosfera. All'inizio fu particolarmente studiato l'effetto degli Ossidi di Azoto, successivamente l'attenzione fu concentrata sull'azione dei clorofluorocarburi CFC, prodotti gassosi di largo uso industriale che fino ad allora erano ritenuti ecologicamente ideali a causa della loro inerzia chimica che li rendeva non tossici e non infiammabili.

La scarsa tendenza a reagire, che è il maggior pregio dei CFC, diventa il loro maggior difetto se prendiamo in considerazione il fatto che queste specie non presentano praticamente meccanismi chimici di eliminazione dalla troposfera, con il conseguente accumulo ad altitudini relativamente basse. La loro bassa densità e la presenza di moti convettivi ne permettono il trasporto anche in quota.

Come è facile intuire, la sommatoria degli effetti delle reazioni che si attivano con la crescita della specie Cl conduce ad una eliminazione di ossigeno dispari molto più rapida rispetto alla situazione naturale, provocando l'ormai tristemente famoso assottigliamento dello strato dell'ozono, particolarmente nella regione antartica. I CFC non sono gli unici 'nemici' dell'ozonosfera, ma anche altre specie inquinanti possono perturbare l'equilibrio dei cicli catalitici naturali. Tra queste possiamo introdurre le famiglie CO_x, NO_x e l'N_2O che possono essere prodotte in quota dal passaggio di aerei supersonici e razzi o essere trasportate dalla superficie terrestre tramite i moti atmosferici.

NOTE

[1] Il presente contributo è stato esposto nella 'lezione-incontro' del 25 ottobre 2006 presso l'Istituto Roncalli-Sarocchi di Poggibonsi, all'interno delle manifestazioni di Pianeta Galileo.

Bibliografia

[1] EPA, How nitrogen oxides affect the way we live and breathe, www.epa.gov/air/urbanair/nox/noxfldr.pdf.
[2] IPCC, International Panel on Climate Change, www.ipcc.ch/pub/online.htm.
[3] Johnston H. S., Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalyst from supersonic transport exhaust, *Science* 173, 1971, pp. 517-522.
[4] Molina M. J., Polar Ozone depletion (Nobel Lecture), *Angew. Chem.*, intern. ed., 35, 1996, pp. 1778-1785.
[5] Molina M. J., Rowland F. S., Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine catalysed destruction of ozone, *Nature* 249, 1974, pp. 810-814.
[6] Wayne R. P., *Chemistry of the atmospheres*, Oxford University Press, Oxford 1993.
[7] Wikipedia, The carbon dioxide, www.wikipedia.org.

I Disturbi del Comportamento Alimentare: un'epidemia moderna

Laura Dalla Ragione

Psichiatra e Psicoterapeuta, Resp.Centro Disturbi del Comportamento Alimentare, ASL2 di Todi

Oggi ho vomitato 8 volte e mi sono tagliata per cercare di smettere. Io non voglio il mondo o soldi, non voglio nemmeno che gli altri si ricordino di me o mi dimentichino, voglio il mio presente visto che il passato è come uno specchio in frantumi. Guardo le mie ferite e mi dico: oggi non doveva andare così, non dovevo picchiarmi, tagliarmi nemmeno e non dovevo trasformare la mia tristezza in rabbia.

Sara, 17 anni, marzo 2005

1. Il cibo come nemico

Nella seconda metà del Novecento, nell'emisfero occidentale, con la diffusione di Disordini del Comportamento Alimentare il cibo e il corpo si trasformano, per milioni di giovani, in nemici. Accade qualcosa che non è solo connesso all'insorgere di una patologia, al cambiamento di stili di vita e modelli culturali, ma forse più intimamente collegato alla difficile strutturazione dell'identità nei giovani di questo nostro mondo.

I Disturbi del Comportamento Alimentare (DCA) costituiscono oggi una vera e propria epidemia sociale [5], che non sembra in questo momento trovare un argine alla sua crescita esponenziale. Due milioni di ragazzi in Italia soffrono di questi disturbi e decine di milioni di giovani nel mondo si ammalano ogni anno. Per ogni 100 ragazze in età adolescenziale, 10 soffrono di qualche disturbo collegato all'alimentazione, 1-2 delle forme più gravi come l'Anoressia e la Bulimia, le altre in manifestazioni cliniche transitorie e incomplete [8]. L'incidenza della patologia del comportamento alimentare, i numeri sconcertanti che sono sotto i nostri occhi ogni giorno, ci hanno costretto a rivedere anche molte delle idee sulla eziologia del disturbo e sulle sue trasformazioni [2].

Il termine anoressia deriva dal greco αν e ορεξις (àn e òrexis) che letteralmente si può tradurre come mancanza di appetito; in realtà il vocabolo risulta essere improprio dal punto di vista epistemologico se utilizzato per indicare un disturbo alimentare come l'anoressia, in quanto, questa non implica una perdita di appetito ma un rifiuto prolungato e sistematico del cibo.

Normalmente una persona, avrebbe bisogno per vivere in buona salute, secondo i dietologi, di almeno 2000 calorie giornaliere; in genere l'espressione «dieta da fame» si riferisce ad un regime di 900 calorie al giorno. Una persona anoressica può arrivare

fino a 320 calorie giornaliere! Non si può semplicemente parlare di un disturbo dell'appetito, la privazione del cibo non è che il sintomo più palese di un disagio che ha radici profonde.

Quando si parla di disturbi alimentari in generale, non si intende solo l'anoressia ma tutte quelle patologie che sono strettamente connesse all'alimentazione, quindi per esempio anche la bulimia (che letteralmente significa fame da bue) o Il Disturbo da Alimentazione Incontrollata. Anzi, possiamo dire che nei disturbi alimentari bulimia e anoressia non sono fenomeni slegati, ma manifestazioni diverse di uno stesso disturbo; non ci si può privare completamente di cibo per lungo tempo; per questo, la persona anoressica va soggetta a crisi bulimiche cicliche, in cui le enormi quantità di cibo ingurgitate vengono poi eliminate attraverso vomito autoindotto.

Quel che però è immediatamente chiaro è che il cibo, nel senso in cui lo intendiamo noi, non ha alcun collegamento con questo tipo di disturbi. Non si mangia troppo o troppo poco, ma si usa il cibo, privandosene o abusandone, per ragioni che hanno più a che fare con l'identità psichica che con l'introito calorico quotidiano. Non dobbiamo scordarlo mai, anche di fronte a volti emaciati o abbuffate da 30.000 calorie, perché altrimenti rischiamo di confondere e non intercettare il nucleo centrale della psicopatologia.

L'origine e il decorso dei DCA sono determinati da una pluralità di variabili (eziologia multifattoriale), nessuna delle quali, da sola, è in grado di scatenare la malattia o influenzarne il corso e l'esito. Una loro piena comprensione deve tenere in considerazione fattori psicologici, evolutivi e biologici. Non è ancora ben noto il ruolo di alcune condizioni antecedenti presenti fin dalla nascita o dall'infanzia, come ad esempio la vulnerabilità genetica, l'ambiente familiare e le esperienze traumatiche. In molti casi alcune caratteristiche individuali, quali il perfezionismo, la bassa autostima, la regolazione delle emozioni, l'ascetismo e le paure legate alla maturità psicologica, precedono l'esordio dei DCA. Sicuramente i fattori socio-culturali sono implicati nel favorire lo sviluppo di questi disturbi e in particolare per il ruolo esercitato dalla nostra cultura che associa la magrezza alla bellezza e al valore personale.

Ogni epoca ha la sua malattia e non c'è dubbio che i Disturbi del Comportamento Alimentare si prestano a rappresentare in modo straordinario questa nostra epoca. Connessi come sono all'immagine corporea, al significato del cibo, all'ossessione per l'apparire. Sono disturbi connessi fortemente alla visione del mondo del nostro tempo, per questo spaventano e attirano nello stesso tempo.

Non si devono confondere, però, gli effetti patoplastici della cultura, quelli cioè che modellano la forma che prendono i sintomi, con i processi patogenetici, quelli che provocano le malattie. L'attenzione estrema all'immagine corporea e il culto della magrezza non sono 'la causa' dei disturbi alimentari. La loro funzione sembra soprattutto quella di suggerire la strada attraverso la quale un malessere più profondo, grave, strutturale, si esprime e cerca una sua risoluzione [1].

La forma che una patologia può assumere in un dato periodo storico è sicuramente

sottoposta alle trasformazioni che questa epoca esprime. La declinazione della sofferenza è dettata da trasformazioni culturali ed è intimamente collegata alle nuove forme del disagio e alla loro evoluzione; davvero difficili da fare rientrare all'interno degli alberi decisionali dei Manuali Diagnostici.

Viene da domandarsi se un numero così imponente di pazienti affetti da disturbi dell'alimentazione rappresenti davvero un'entità nosografica a sé stante o se non sia costituito in verità da una popolazione di individui vulnerabili che, in altri tempi, avrebbero sviluppato forme diverse di patologie depressive o psicotiche, o ancora che siano, come altri affermano, una eredità dell'antica Isteria. Queste domande non sono un puro esercizio filosofico ma questioni che hanno un rilevanza non secondario nel modo in cui il disturbo viene affrontato.

Mentre Jaspers [7] utilizzava la parola *Zeitstil* per definire questa reciproca risonanza, o stile particolare di una malattia secondo i tempi, Russel [10] esprime lo stesso concetto con il termine *patoplasticità*. Esiste dunque una sorta di evoluzione, ma nel caso dell'evoluzione del disagio psichico e in generale della malattia mentale, l'andamento è, come direbbe il paleontologo S. J. Gould [6], punteggiato e poco lineare. Fa più pensare a una sequenza di catastrofi e grandi sparizioni. L'isteria scompare improvvisamente nel Novecento e fanno la loro comparsa altre grandi sofferenze della psiche: la depressione e i disturbi del comportamento alimentare .

In questo senso viene usata la parola patoplasticità: i disturbi sono «plastici» , adattabili, flessibili ai decorsi storici. La forma che essi assumono è effetto del contesto specifico nel quale si iscrivono. Fattori patoplastici sono tutti quelli che concorrono ad delineare la fenomenologia del malessere, senza tuttavia determinarlo; essi esercitano, diversamente dai fattori causali (che nella patologia in questione, così come in molte altre patologie psichiche, rimangono elusivi), un'azione predisponente, modellante e formativa.

Emerge nello stesso tempo una certa variabilità delle forme patologiche, una molteplicità irriducibile di forme e presentazioni, di ritmi, di decorsi evolutivi che variamente si completano, si contrappongono, si implicano. Il problema della creazione di nuove forme patologiche, o meglio di nuove strutture patologiche, appare inestricabilmente connesso con il problema delle ricorrenti ricombinazioni, secondo modalità di volta in volta differenti , di questi tempi, di questi ritmi, di queste direzioni evolutive.

Rintracciamo all'interno di questi disturbi una serie di analogie con altre patologie, ma nello stesso tempo la qualità psicopatologica delle sindromi ci appare come irriducibile alle conosciute nosografie.

2. Ma i Disturbi del Comportamento Alimentare sono sempre esistiti?

I disturbi del rapporto dell'uomo con il cibo e l'alimentazione sono stati descritti anche in epoche remote. Ma è solo nel Novecento, in una parte limitata del mondo, che si è presentato il problema di amministrare un'offerta di cibo sovrabbondante e seduttiva e

che il problema alimentare si lega indissolubilmente all'immagine del corpo.

Nelle società industriali avanzate un numero sempre più elevato di individui, soprattutto donne, dedica grande attenzione e preoccupazione al controllo del peso e dell'immagine per mezzo di diete, esercizio fisico e altri comportamenti, più o meno nocivi. Il fenomeno disegna lo sfondo sul quale va collocato e interpretato il progressivo aumento dei Disturbi del Comportamento Alimentare.

I Disturbi del Comportamento Alimentare sono sindromi cosiddette *culture bounded*, legate a certe culture e specifiche di alcuni paesi. Ne dobbiamo tenere conto per valutare la patogenesi e la diffusione di questi disturbi.

Sono disturbi frequenti nei paesi ricchi e fortemente industrializzati: Europa occidentale, Stati Uniti, Canada, Australia e Nuova Zelanda, Sudafrica, Giappone. Sono assenti o molto rare nei paesi poveri dell'Africa, dell'Asia e dell'America Latina. La diffusione di queste patologie nei paesi dell'Est europeo (aumentata a partire dalla caduta del Muro di Berlino), del Terzo Mondo e fra gli immigrati da nazioni povere verso nazioni ricche appare correlata al miglioramento delle condizioni economiche e, ancora di più, ai processi di occidentalizzazione culturale. È da notare che, nei paesi poveri, parallelamente all'aumento dei Disturbi del Comportamento Alimentare stanno aumentando, in misura esplosiva, i casi di obesità.

Il culto della magrezza femminile segue la stessa distribuzione geografica e temporale dei disturbi dell'alimentazione. In India, per esempio, l'aumento dei casi di Anoressia e Bulimia sembra seguire, in modo inverso, la diminuzione delle misure delle attrici più popolari del cinema indiano.

Il caso del Giappone è abbastanza paradigmatico: in questo paese la forte ambivalenza tra modelli culturali orientali e occidentali è documentata dalle percentuali di prevalenza dei DCA riscontrate in alcuni studi: se i sintomi anoressici sembrano essere piuttosto rari (1 caso su 500 in città e 1 su 2000 in ambiente rurale), lo stesso non può essere detto per la Bulimia, chiamata *Kibarashi-gui,* la cui prevalenza varia in Giappone dal 2,1 al 3,6% a seconda della zona considerata.

Sempre più difficile diventa oggi fare rientrare le forme davvero mutevoli dei Disturbi del Comportamento Alimentare entro gli alberi decisionali delle nosografie condivise. Negli ultimi anni le innumerevoli pazienti che ho incontrato mi hanno fatto pensare che oggi una varietà davvero grande di disturbi venga inghiottita, come in un *imbuto*, da ciò che è descritto come patologia alimentare.

Infatti, oltre alle mutazioni nelle prevalenze dei vari Disturbi Alimentari, assistiamo anche ad un trasformarsi della patologia dei singoli pazienti che sempre più frequentemente migrano da un sintomo all'altro nell'arco della loro storia patologica. La ricostruzione anamnestica del disturbo ci mostra una stessa paziente che inizia a digiunare e a dimagrire ferocemente, poi dopo un certo periodo perde il controllo e inizia ad abbuffarsi e per cercare di contenere l'aumento di peso inizia ad usare il vomito autoindotto, poi ancora può utilizzare l'iperattività fisica o lassativi e diuretici , che sono tra l'altro una delle cause di morte più frequenti. Ma alla base di tutti i disturbi

c'è un unico nucleo psicopatologico: l'ossessione per il controllo del corpo, ottenuta attraverso tutti mezzi possibili e immaginabili.

Le forme del disturbo sono andate così mutando, proprio come un virus insidioso. Dall'iniziale caratterizzazione «astinente» dell'anoressia (ove il disturbo si esauriva esclusivamente nel digiuno) ha fatto seguito, attorno agli anni settanta, l'innesto di alcuni comportamenti tipici del versante bulimico. Negli anni Ottanta sono aumentati i casi di bulimia normopeso, e il disturbo è andato progressivamente evolvendo verso forme multicompulsive con l'aumento di abuso di alcool e di droghe, di gesti autolesionistici e di disturbi della condotta. Non è un caso che nell'ultima edizione del Manuale Diagnostico e Statistico dei Disturbi Mentali è stata inserita un'altra categoria, che è quella dei Disturbi del Comportamento Alimentare non Altrimenti Specificati, di cui fanno parte le sindromi parziali, chiamate anche subcliniche o più correttamente subliminali, in cui sono presenti alcuni ma non tutti i sintomi necessari per la diagnosi di anoressia e bulimia, che sono in questo momento molto frequenti.

Ormai rientrano all'interno di queste sindromi parziali la maggioranza tutti quei quadri associati alle presunte o vere intolleranze alimentari, altra grande paura del nostro secoli, all'ortoresssia, (ossessione per il cibo sano) e a forme di alimentazione estreme in un senso o nell'altro .

Tra i quadri atipici, il disturbo da alimentazione incontrollata (Binge eating disorder, bulimia senza contromisure di compenso) ha suscitato nell'ultimo decennio un interesse crescente per i suoi legami, importanti, con l'obesità, altro grande fenomeno fortemente correlato ai Disturbi del Comportamento Alimentare.

Le due principali patologie (Anoressia e Bulimia) rappresentano oggi gli estremi di un continuum fenomenologico, lungo il quale trovano posto tutta una serie di configurazioni intermedie, ibride, passibili di un'esistenza autonoma rispetto ai disordini «ufficiali» e non necessariamente di essi predittive. Le diverse manifestazioni non giacciono su livelli qualitativi separati, bensì sono divise da una soglia puramente quantitativa lungo una scala di severità clinica. Il caso da manuale sembra infatti essere sempre più una rarità nella pratica clinica; le forme «pure» di patologia sono ormai costruzioni virtuali, volte forse a soddisfare esigenze di ordine classificatorio ma sicuramente non più in grado di rappresentare la presentazione delle innumerevoli forme del disturbo.

3. Una malattia del nostro tempo

Nei Disturbi del comportamento alimentare c'è un'evidenza a favore di fattori storici facilitanti l'espressività di fattori naturali del disturbo.

Le pressioni sociali agiscono attraverso i messaggi contraddittori sul ruolo della donna comunemente filtrati dai *mass-media* e dagli imperativi sociali subliminali: la si vorrebbe votata ai valori della famiglia e della casa (come la donna di ieri), ma le vengono richieste, oltre alle doti di tipo più tradizionale, anche i caratteri dell'autonomia e dell'indipendenza–competitività, tipicamente maschili. Questo primo livello

contribuisce a creare un autentico disagio psicologico in soggetti vulnerabili, che viene amplificato dalla preferenza, questa volta più evidente, per l'immagine della donna magra e scattante.

Ma sull'influenza dei modelli culturali alcune riflessioni sono d'obbligo. I modelli percettivi e cognitivi hanno teorizzato il ruolo dei fattori socio-culturali esclusivamente in termini di «pressione a favore della magrezza» ; il significato dell'ideale della snellezza è stato spesso ignorato come forma culturale, espressione di ideali, ansie e mutamenti sociali molto più profondi di quelli puramente estetici. Un brano della drammaturga e poetessa Eva Ensler ci restituisce la relazione tormentata tra il modello mediatico del corpo, che si nutre delle nevrosi femminili e maschili, e quello reale che ci guarda dalla specchio, ovviamente assolutamente imperfetto:

> *Io non andrò mai bene. Questa certezza alberga ogni parte del mio essere. Chiamatela colpa o vergogna. Occupa ogni minima parte di me. Più divento vecchia e apparentemente saggia e sicura di me, più la sensazione di inadeguatezza diventa ambigua, totale e terroristica. Penso che per molte di noi, o meglio la maggioranza, o forse per tutte noi, esista una parte specifica del corpo, i glutei, il seno, i capelli, il naso, il mignolo del piede. Sapete di cosa parlo, vero? Non importa in quale parte del mondo mi trovi, che sia Teheran, dove le donne si fanno rompere e rimodellare il naso per sembrare meno iraniane, o Pechino, dove si fanno spezzare le gambe e aggiungere ossa per essere più alte, o Dallas dove si fanno ridurre la lunghezza dei piedi per potere rientrare in un paio di Manolo Blahnik o di Jimmi Choos. Ovunque ho conosciuto donne che odiano una particolare parte del prorio corpo. E passano quasi tutta la vita ad aggiustarla. È come se si fossero assegnate un piccolo territorio, il loro corpo, che cercano di tiranneggiare, pulire, controllare mentre perdono di vista il mondo.* [4]

Ma la questione non è poi così semplice. I media e l'industria culturale vengono regolarmente interpretati come il solo nemico capace di assoggettare giovani donne passive e influenzabili, ed ora anche giovani uomini apparentemente più aggressivi e intraprendenti.

Perché la magrezza sia divenuta un ideale culturale dominante nel ventesimo secolo è oggetto di discussione ; per il sesso femminile l'anoressica incarna, in modo estremo, una battaglia psicologica tipica della situazione attuale delle donne, una situazione in cui l'azione congiunta di fattori sociali, economici e psicologici diversi ha prodotto una generazione di donne che si considerano piene di difetti, si vergognano delle proprie esigenze e non si sentono autorizzate a esistere, se non a condizione di trasformare se stesse in persone nuove e degne (cioè senza esigenze, senza bisogni, senza corpo).

L'anoressia rappresenta uno degli estremi di un *continuum* sul quale oggi si trovano tutte le donne, in quanto tutte più o meno vulnerabili alle esigenze della costruzione culturale della femminilità, per cui la cultura – la quale opera non solo mediante l'ideologia e le immagini, ma anche mediante l'organizzazione della famiglia, la costruzione della personalità, l'educazione della percezione – non concorre semplicemente all'insorgere dei disturbi alimentari ma addirittura ha un ruolo preminente nel produrli .

Ne sono conferma due aspetti singolari dei disturbi del comportamento alimentare: in primo luogo, essi sono molto più frequenti nella popolazione femminile (circa il 90% delle persone che ne soffrono è composto da ragazze o donne); in secondo luogo, i disturbi alimentari rappresentano un fenomeno culturalmente e storicamente situato: nelle società industriali avanzate degli ultimi cento anni circa. Nel corso della storia, sporadicamente, sono stati documentati diversi casi isolati, ma è solo nella seconda metà dell'Ottocento che una sorta di contenuta epidemia di anoressia mentale viene menzionata per la prima volta nei resoconti medici; e una tale frequenza scompare di fronte allo straordinario dilagare dell'anoressia e della bulimia negli anni ottanta e novanta del nostro secolo.

Il quadro delineato quindi solleva dubbi sulla possibilità di potere designare l'anoressia e la bulimia secondo criteri strettamente clinici, ponendo invece l'accento sul carattere acquisito, culturalmente determinato, di tali disturbi e ridefinendo il ruolo della cultura quale fattore primario nella produzione dei disturbi del comportamento alimentare, e non di fattore scatenante o concomitante.

La cultura non ha solo insegnato alle donne a essere *corpi insicuri*, continuamente alla ricerca su se stessi di segni d'imperfezione; ha anche insegnato alle donne (e agli uomini) a vedere il corpo in un certo modo: la magrezza è stata sempre decantata come un pregio da un punto di vista estetico, ogni curva e rotondità finisce per essere vista come sgradevole, come grasso inestetico che deve essere eliminato. Alla luce di questa analisi, non è che l'anoressica percepisca in modo errato il proprio corpo; piuttosto, ha appreso perfettamente gli standard culturali dominanti relativi al modo in cui percepirlo. La nostra è una cultura in cui le diete rigide e l'esercizio fisico intenso sono continuamente intrapresi da un numero sempre più alto di ragazze sempre più giovani: addirittura di sette o otto anni, secondo alcune ricerche; in altre parole, la nostra società sta producendo una generazione di donne giovani e privilegiate con gravi disturbi mestruali, nutrizionali e mentali.

Ma come può un'analisi culturale spiegare il fatto che i disturbi del comportamento alimentare si manifestano solo in alcuni individui, benché tutti siamo soggetti alle stesse pressioni socio-culturali? In realtà non siamo esposti tutti «alle stesse influenze culturali» ; ciò cui tutti siamo esposti, piuttosto, sono le immagini e le ideologie omogenizzanti e normalizzanti relative alla femminilità e alla bellezza femminile. Tali immagini premono a favore della conformità ai modelli culturali dominanti, ma l'identità individuale non si forma soltanto attraverso l'interazione con tali immagini, per quanto potenti possano essere. Le particolari configurazioni (appartenenza etnica, posizione socio-economica, fattori genetici,educazione, famiglia, età e così via) da cui risulta la vita di ciascuno sono ciò che determina il modo in cui ogni singola donna viene influenzata dalla nostra cultura. L'identità di ognuno di noi su costruisce a partire da vincoli genetici, morfologici, culturali, familiari, psichici, che insieme determinano la nostra posizione nel mondo e la nostra libertà.

Ma ancora più fortemente questi disturbi sono ancorati alla visione del mondo più

diffusa in questa parte del mondo occidentale. È questo che ci spiega perché queste pazienti sono così tenacemente attaccate al loro sintomo, anche se le porta alla morte.

4. Il corpo virtuale

La lontananza dal corpo, la manipolazione estrema, la perdita dei confini dell'identità corporea, declinano una trasformazione che non riguarda solo *il costume*, ma piuttosto qualcosa che ha a che fare con un'idea meccanicista e riduzionista del corpo – macchina da smontare e rimontare, con un disinvestimento drammatico nei confronti di ciò che è vivo, della carne ridotta ad un insieme di ingranaggi. Il corpo moderno è fatto di due corpi, uno virtuale – quello smaterializzato della Rete – e un altro che si potrebbe definire *ipercorpo*, un corpo che contiene altri corpi, ad esempio nei trapianti o nelle biotecnologie.

Uno degli aspetti più sconcertanti nella diffusione e nella globalizzazione dei Disturbi del Comportamento Alimentare è l'utilizzazione del *web* nella trasmissione di modelli culturali che enfatizzano la magrezza, con la comparsa di siti che propagandano comportamenti patologici, finalizzati al controllo del peso e danno consigli estremi su come dimagrire .

I siti pro-Ana, dove Ana sta per anoressia, costituiscono uno dei canali più efficaci di diffusione del disturbo, soprattutto tra gli adolescenti, che utilizzano questo mezzo quotidianamente e con estrema familiarità.

La caratteristica di questi siti è quella di costituirsi come delle sette, sorta di movimenti *underground* dove si lancia un appello a dimagrire ad oltranza, come una forma di protesta e opposizione al mondo degli adulti . Il segno distintivo dei seguaci di Ana è un braccialetto rosso, che viene venduto ad un prezzo che varia dai 3 ai 20 dollari, e che consente il riconoscimento anche fuori dal web.

L'esplorazione di questi siti, che, essendo proibiti, vengono ciclicamente chiusi e riaperti, proprio come quelli dei pedofili, lascia davvero interdetti per il livello di terrorismo psicologico, cui possono essere sottoposti gli adolescenti che vi entrano (si pensi alle foto di giovani donne obese in costume da bagno, con una didascalia: *Ecco come i vostri genitori vogliono farvi diventare*). I comandamenti pro–Ana, cui gli adepti dei siti devono attenersi, sono tutti centrati sull'equazione che la magrezza *è* la salvezza, la strada principale per essere vincenti e felici.

Non è nuova nella storia della medicina una sorta di dimensione estetica di alcune malattie: pensiamo ad esempio alla tubercolosi nell'Ottocento, così ben rappresentata dal romanzo *La montagna incantata* di Thomas Mann o alla sifilide o all'AIDS. Ma non c'è nulla che possa essere paragonato a questa rappresentazione del corpo che enfatizza la malattia e nello stesso tempo cerca di allargare intenzionalmente il contagio.

I Disturbi del Comportamento Alimentare sono malattie gravi e dall'esito spesso infausto, sono la prima causa di morte tra le malattie psichiatriche; e la causa del decesso più frequente, oltre quella collegata a complicanze internistiche è il suicidio. È difficile accettare che qualcuno possa intenzionalmente diventare una sorta di *untore* e

diffondere tra adolescenti che *chattano* o *navigano* in rete un disturbo che porta a tali e gravi conseguenze.

Alcuni stralci di queste conversazioni in *chat*, nei *forum*, nei *blog*, generalmente notturne, ci introducono all'interno di un mondo, che si apre appena le porte di quelle camerette piene di manifesti e *pelouche* si chiudono. Le ragazzine, veramente quasi bambine, entrano in realtà dove per dimagrire si può fare di tutto, dove i genitori sembrano fantasmi inesistenti e dove i coetanei suggeriscono sistemi di controllo del peso efficaci e pericolosissimi.

Come in tutte le *chat*, tutto avviene in presa diretta e le conversazioni si interrompono perchè una delle partecipanti al forum deve andare in bagno a vomitare, oppure a fare pipì dopo avere ingerito i diuretici che la nonna prende per il cuore. Le altre, appena torna in *chat*, le domandano com'è andata e si congratulano con lei se è riuscita nel suo intento.

Alice ha 15 anni e il suo *nick-name* è Ashley, passa intere giornate e notti al computer, *chattando* in forum pro-Ana. Quando viene ricoverata nella Residenza Palazzo Francisci, Alice pesa 35 kg ed è alta 1,60, parla con parole non sue, quasi un linguaggio in codice, comprensibile solo visitando i dialoghi delle *chat*. Parla di un corpo che non esiste veramente, un corpo patinato, manipolato, irreale. Un corpo virtuale che è anonimo, che può scegliere l'identità maschile e femminile, a seconda di come decide di rappresentarsi, poiché in rete chiunque può dichiarare di essere quello che vuole essere. E neppure quando questo corpo diventa reale nel rischiare la morte e i genitori la ricoverano, il suo modo di parlare di sé e della sua malattia diventa più adeguato alla drammaticità dell'evento.

Per ore e ore i partecipanti a questi dialoghi senza fondamento, si incontrano senza memoria né immaginazione, in un tempo sospeso, ove la sequenza di attimi, *flash*, frammenti di vita, non costruisce nessuna storia, nessuna temporalità. In questo mondo gli adulti non possono entrare e si coglie tutto il rinforzo positivo del sintomo dato dall'opposizione, dal senso di onnipotenza che tutti i partecipanti alle *chat* manifestano.

Ogni aspetto del corpo, del cibo, di ciò che fa bene e di ciò che fa male viene dissacrato e irriso, si diffondono in web le leggende più inverosimili finalizzate alla perdita di peso, favole, fandonie, bufale di ogni genere. Ma l'argomento è così interessante e seducente che tutti scrivono e leggono di tutto. Una delle più diffuse piramidi alimentari viene trasformata in un manifesto contro il cibo: il cibo è il diavolo. E mai metafora fu più pertinente, nella forza dannosa che assume l'ossessione perenne per il cibo, che viene spogliato dalla sua funzione di nutrimento, fonte di vita e calore. Non c'è dubbio che in questo caso la forma patologica si connette molto facilmente a forme culturali e questo ne spiega l'irrefrenabile diffusione, ma forse c'è qualcosa di più e scelgo le parole di uno storico della scienza e delle idee, Paolo Rossi, che di questi temi si è occupato, per esprimere la difficoltà a separare la patologia dall'impianto culturale che le da nutrimento:

Nonostante tutti questi esempi, mi sembra resti vera l'asserzione che nessuno ha mai fatto propaganda a favore dell'assunzione o della diffusione di una malattia. Di fronte alla diffusione del culto di Ana possiamo domandarci: davvero si tratta, in questo caso, di propaganda a favore di una forma patologica o non si tratta invece dell'antica esaltazione del digiuno e della magrezza che sarebbero sinonimo di saggezza e di santità nelle filosofie orientali e, in particolare, indiane? O anche nell'ideale cristiano di una frugalità spinta fino ai limiti estremi? Di una santità che è fondata sul rifiuto del corpo, luogo di tentazione e strumento di peccato? o all'immagine (molto antica) del digiuno come purificazione? Una malattia che si connette a scelte di comportamenti e quindi, indirettamente, a filosofie e a scelte di vita, alle credenze e al costume perde per questo il suo carattere di specificità patologica, fino a diventare, in una certa misura, qualcosa di non più riconoscibile? [9]

5. Ruolo della famiglia

I DCA costituiscono in prevalenza una patologia dell'età evolutiva significativamente imbrigliata nelle dinamiche del gruppo familiare; non affrontare tali legami significherebbe rallentare o addirittura rendere impossibile il cambiamento nella paziente. Tuttavia, le teorie degli anni settanta, che vedevano la famiglia come l'elemento più accreditato nella patogenesi del disturbo alimentare, sono state abbandonate, in nome di un'ipotesi eziopatologica multifattoriale, che tiene conto dei numerosi fattori di rischio temperamentali, traumatici, sociali, culturali. Anche il quadro epidemiologico degli ultimi anni, con l'aumento esponenziale della patologia, non ci restituisce la presenza di una famiglia «tipo» cosiddetta patogenetica, ma piuttosto una trasversalità sociale, antropologica, psicologica estremamente variegata, così come diversificato risulta il disturbo. La variabile familiare costituisce sicuramente uno dei fattori di rischio, ma soprattutto gioca un ruolo decisivo in quanto fattore di mantenimento del disturbo.

Quello che accade dentro la scena familiare, quando la patologia irrompe scardinando equilibri e determinando fortissime tensioni, può fare la differenza rispetto all'andamento e alla prognosi del disturbo stesso. Cito una lettera di Matilde, ricoverata nel 2005 per una grave forma di bulimia multicompulsiva, dove i genitori sono visti attraverso gli occhi della figlia come «morti dentro, uccisi dal loro amore e dai loro pianti «ed è chiaro come questa profonda angoscia dei genitori attivi in Matilde una infinita e ricorsiva tristezza.

> Fino ad oggi ho preso due volte il Lexotan, anche se altre volte non ho fatto in tempo ma il vero problema è che ho vomitato 10 volte e mi rattrista questa situazione, sono nervosa: sarà il ciclo, sarà che io non so stare calma per natura ma mi fa male sapere che sono crollata nuovamente. Ho paura tanta, troppa. E mi dispiace anche scrivere solo queste brutte notizie. Sono stanca di avere i miei genitori morti dentro, uccisi dal loro amore e i loro pianti, i loro: Ma come anche oggi! (mia madre, quasi scocciata, stanca anche lei di questa situazione). Chissà quando riuscirò per un po' a controllare i miei impulsi, questa estate forse parto con due amiche, ma ho paura perché tanto vomiterò e allora come

> farò? stesso bagno, non mi sento pronta ma voglio viaggiare. Ho pensato anche alle missioni in Africa, perché mio padre mi ha parlato di un missionario, da allora penso che forse quella è la mia strada, ma devo prima guarire, vero? Eppure vorrei cambiare la mia vita perché sono stanca di piangere e vomitare, guardarmi in faccia e vedere due occhi vuoti pieni di vita frantumata, i cui pezzi puzzano di sporco. Non ci capisco più niente.
>
> *Matilde, 23 anni, marzo 2005.*

Presso il Centro che dirigo, Palazzo Francisci di Todi, lavorare con la famiglia e coinvolgere i familiari nella battaglia contro la malattia, considerandoli soggetti attivi del trattamento, diventa decisivo e può assumere un'importanza rilevante per l'esito del trattamento. I genitori arrivano pieni di preoccupazione, dilaniati dai sensi di colpa, generalmente dopo mesi di contrattazione fallimentare con le figlie sul loro cibo e sul loro peso. Chiediamo a questi genitori di dimenticarsi di quello che in greco si chiama *aitia*, parola che designa contemporaneamente la colpa e la causa.

Cerchiamo di prepararli ad un compito che sarà lungo e difficile, rassicurandoli però che da questo disturbo oggi è possibile guarire. Cerchiamo anche di comunicare loro che saranno sostenuti in tutti i passaggi del trattamento e che non saranno mai abbandonati dall'*équipe*.

In questi anni, mi sono trovata spesso di fronte a genitori ai quali nessuno aveva spiegato la natura del disturbo alimentare, né quali fossero le fasi necessarie per la guarigione. Anche qui come accade nei confronti di ogni altra malattia che non si conosce, l'ansia e la paura aumentano di fronte ad un nemico sconosciuto.

Dal momento dell'ingresso della paziente a Palazzo Francisci, i familiari vengono progressivamente coinvolti in un programma di incontri quindicinali con lo psicologo e con il filosofo, allo scopo di mettere a fuoco le dinamiche interne alla famiglia che possano avere avuto una qualche influenza nello strutturarsi del disturbo. Una volta al mese, si svolgono in Residenza incontri di gruppo a cui partecipano i familiari e gli amici delle pazienti ricoverate, finalizzati, da un lato, all'acquisizione di informazioni generali sulla patologia, che nonostante una maggiore attenzione da parte dei *mas-media*, resta in gran parte incompresa anche nelle famiglie in cui si verifica, dall'altro, a depotenziare il carico di angoscia e di colpa, spesso vissuto in solitudine, attraverso la condivisione di esperienze simili. Questo genere di incontri fornisce anche un notevole rinforzo alle proposte e agli impegni di cambiamento all'interno delle famiglie: la riuscita di una strategia in uno dei nuclei familiari coinvolti fornisce l'esempio pratico e concreto del modo in cui alcuni cambiamenti possono realmente verificarsi.

Questa è la lettera ai genitori di Roberta: un'altra paziente, anoressica, ricoverata presso il nostro Centro :

> Cari custodi della mia essenza,
> mi rivolgo a voi in questa lettera, per dirvi cose che non sono stata in grado di dire a voce per la solita paura di ferirvi, di deludervi o semplicemente per la paura di esternare le mie emozioni. Sono ormai quasi tre mesi che non

vivo più a casa con voi. Più di tre anni che pur vivendo sotto lo stesso tetto, attorno alla stessa tavola, sullo stesso divano, non era più la stesa cosa. Ed ora, ora che più che mai, potrei pensare con più calma, distanza, avverto la vostra assenza: la voglia di raggiungervi in ogni istante e nello stesso tempo la paura di rivedervi.. la voglia di fuggire e sentirmi libera. Un po' come quando di fronte ad un trancio di pizza, sento il desiderio mi sento impotente e in colpa solo per essermi permessa di desiderarlo. Sono stanca, tanto stanca, rivoglio la mia mamma e il mio papà, che hanno fatto sempre tutto per aiutarmi, vigilando sulla mia vita per paura si potesse rompere. Forse con questo tipo di protezione non sono riuscita a volare. E' dura rendersi conto che la nostra famiglia non è perfetta come ha sempre sostenuto: ciò che lo faceva intendere la stessa maschera che da 5 anni a oggi ho portato addosso per mascherare la Roberta che c'è sotto. Ma ho imparato a capire che la perfezione non esiste e vorrei tanto che lo capiste anche voi: che lo accettaste. Forse così la vita sarebbe per voi non dico più semplice ma meno amara. La nostra vita va adeguata alle nostre imperfezioni: solo così potremmo noi tutti evitare di sentirci in colpa per tutto ciò che facciamo e decidiamo. Ho trascorso 5 anni di autodistruzione, con grande fatica sto imparando a lasciarmi andare: per far nascere una nuova Roberta che sia il frutto di nuove conoscenze, grazie alle quali potrò vedere le cose diversamente; così la mia vita potrà essere diversa, frutto di nuove scelte. Mi dispiace vedervi soffrire per me, mi dispiace vedervi spendere la vita solo dal mio pensiero. So che una figlia dovrebbe esservene grata ma io non sono in grado di contenere tutto il vostro amore, le vostre apprensioni, mi hanno soffocato facendomi cadere nell'illusione che non avevo bisogno delle vostre attenzioni, del vostro affetto, cosa che non ho mai smesso di desiderare ardentemente. Ho continuato a dirvi questa bugia per molti anni, fino a convincermene ma la mia era solo una difesa da voi, voi che per paura del dolore avete fatto di tutto per non farmelo sperimentare, il risultato è stato più dolore. Ciò che vorrei farvi capire con la mia esperienza è che no esiste una vita bella o una vita brutta, una vita priva di sofferenze o una vita piena di sofferenze: ciò che le rende diverse è il modo in cui si soffre. Soffrire è alzarsi in piedi , ogni giorno ognuno di noi affronta la propria personale battaglia per vivere, rischiando e accettando di poter soffrire. Questa non è rassegnazione, anzi è un grande abbraccio verso la vita, che è spesa alla propria realizzazione e non al risultato. Pochi sanno vivere così, e noi tutti, fino ad oggi, abbiamo dimostrato di non esserne capaci. Ora voglio rivolgermi at, papà, che vedo soffrire in silenzio a causa mia, invecchiare come se per te fosse una sconfitta, come se fossi tu quello che ha perso la battaglia con la vita. Cerchi sempre di darmi consigli, ti appelli sempre alla volontà, la vita non è un atto di volontà, esistiamo noi con i nostri danni e le nostre debolezze. Bisogna costruirla la propria vita e non la devi sudare per farla godere a qualcun altro che a tuo avviso ne ha il diritto. Non spaventarti del tempo che passa perché non è lui che ti porta via ma tu stesso che ne disponi tutti i giorni, ogni attimo. Quanto a te mamma, voglio dirti due parole, le stesse che ogni giorno mi ripeto nella speranza che tu sappia ascoltare. Ti prego di non sentirti accusata: nessuno né tanto meno io, ti vuole puntare il dito contro. Io non sono te. Siamo due

> persone diverse, apparentemente uguali ma fondamentalmente distinte l'una dall'altra. Fai le tue scelte, prendi le tue decisioni per ciò che riguarda te stessa, solo così io potrò fare le mie. A me voglio provare a pensarci da sola. E non provare reprimere l'ansia: è come se ti impedissi di gioire o di soffrire, lo so che quando mi parli pretendi di sapermi leggere dentro. Ma non è sempre così. Liberati dalla presunzione di potere tutto e sapere tutto. Non vedermi come tu desideri … questo non è vivere è andare avanti. Posso considerare questa come la prima effettiva richiesta di aiuto: una riflessione che ognuno di noi potrà fare su sé stesso. Il pensiero è importante, è un arma contro il dolore. Una ultima cosa. Il fatto che io sia anoressica non fa di me un incapace, una deficiente, né tanto meno una bambola di porcellana che si ha paura si possa rompere anche con una sola parola. Vi prego tornate a vedermi e troverete quelle parole che ora vi mancano. Torniamo a parlare. Vi voglio bene.
>
> *Roberta, 20 anni, aprile 2006.*

La malattia dei propri figli viene spesso sentita come un accusa su di sé, mancano le parole, si smette di parlare o più profondamente d'ascoltare. Genitori smarriti, che si trovano da soli a dover affrontare un disturbo, a volte culturalmente incomprensibile: il rifiuto del cibo, dei pasti in comune, nega e sconfessa ogni forma d'intimità familiare: *questi figli sputano sul nostro lavoro, tradiscono queste mani che lavorano per dargli da mangiare.* Sono le parole di un padre, uno dei tanti, che ogni fine mese intervengono agli incontri della residenza di Palazzo Francisci. È un padre smarrito, ha visto spazzare via dalla malattia della propria figlia, tutto ciò che culturalmente lo legava alla sua funzione genitoriale; viene da un piccolo centro agricolo della Basilicata, le sue *mani* sono abituate al lavoro duro, la ricompensa a fine giornata è rappresentata da un pasto ricco in comune. Questa figlia mette in discussione un ordine tramandato da generazioni di padri e figli che sembrava immutabile.

Comprensibile è lo sgomento e l'angoscia, che un problema del genere porta nel contesto familiare. Tuttavia lo stesso smarrimento, lo ritroviamo sotto altre forme in altre famiglie, tutte si presentano con un'unica domanda: *perché, come è potuto succedere, perché proprio a noi?.* Non è facile rispondere, non è facile sostenere il loro sguardo, il dolore ha bisogno di una sua particolare forma di ascolto. Solamente in un dialogo costante è possibile rintracciare un senso nuovo, in grado di far fronte a tanta angoscia. Spiegare a questi genitori che la malattia dei propri figli non è un atto d'accusa nei loro confronti, confortarli nell' indicare un cammino terapeutico comune, non è sempre facile. Hanno paura, come ha paura chi non riesce ad individuare il nemico, devono combattere delle ombre, dei fantasmi che vivono dentro la testa di una persona tanto amata. Questo è il tributo più grande che ogni esperienza d'amore richiede, capire l'incomprensibile e sperare l'impossibile.

La malattia di un figlio può, e deve rappresentare, un'occasione privilegiata per guardare dentro sé e dentro gli equilibri della famiglia; rappresenta un momento esistenziale privilegiato per crescere, senza dare niente per scontato o acquisito. *Una vita che non è stata messa alla prova non è un'autentica vita,* dichiarava Socrate: una

famiglia, una relazione, che non sia stata messa alla prova, non è un' autentica famiglia. Ogni forma d'intimità deve superare delle crisi, uno stravolgimento degli assetti dati, per ritrovare un orizzonte in comune. Per questo è d'importanza fondamentale che i suoi componenti non si sentano minacciati dal dolore, il Talmud insegna: *I cardini reggono la porta e le prove reggono l'uomo. Se sarai capace di accogliere le tribolazioni e di sopportarle, accettandole come prove della tua resistenza e consistenza, allora quelle pene si trasformeranno in cardini e ti reggeranno*[10]. Le prove affrontate divengono il sostegno, i cardini su cui poggiamo. Si può diventare persone migliori dopo esperienze così drammatiche, e se un senso è possibile, se una resurrezione è realizzabile nell'orizzonte umano, quel senso appare nel superamento della negatività: nell'incessante lotta del bene contro il male, della salute contro la malattia, della verità contro l'inautenticità.

Il cammino verso l'autenticità non è una marcia trionfale, la sua strada è disseminata di disconoscimenti, fraintendimenti: bisogna sperimentare molti falsi sé prima di rintracciare una lieve traccia di verità.

Bibliografia

[1] Dalla Ragione L. e Bianchini P., *Il cuscino di Viola. Dal corpo nemico al corpo consapevole,* Edizioni Diabasis, Reggio Emilia 2006.

[2] Dalla Ragione L., *La casa delle bambine che non mangiano*, Il Pensiero Scientifico, Roma 2005.

[3] De Luca E., *Alzaia,* Feltrinelli, Milano 1997, p. 25.

[4] Ensler E., *Il corpo giusto,* Marco Tropea Editore, Milano 2005.

[5] Gordon A R., *Anoressia e bulimia, anatomia di un'epidemia sociale*, Cortina, Milano 1990.

[6] Gould S. J., *Il pollice del panda* , Roma, Editori Riuniti 1983.

[7] Jaspers K., *Psicopatologia generale,* Il Pensiero Scientifico Editore, Roma 1964.

[8] Ministero della Sanità, Commissione di studio per l'assistenza ai pazienti affetti da Anoressia e Bulimia Nervosa, *Annali della Sanità Pubblica (Nuova Serie)*, 1998; III; 1, 2, 3, pp. 9-20.

[9] Rossi P., La Natura, il mangiare, la cultura, in [2], p. XXXIII.

[10] Russel G. F. M., The changing nature of anorexia nervosa, *J. Psychiat. Res.* 19, 1985, pp.101-9.

Rilevazioni, mappe geolinguistiche e prospettive di ricerca in aree multilingui

Carla Bagna

Università per Stranieri di Siena

0. Introduzione

Il presente contributo ha l'intento di presentare in sintesi l'impianto teorico-metodologico delle ricerche e rilevazioni effettuate dal Centro di Eccellenza della Ricerca – *Osservatorio linguistico permanente dell'italiano diffuso fra stranieri e delle lingue immigrate in Italia* dell'Università per Stranieri di Siena, linea di ricerca *Lingue immigrate*.

L'Osservatorio ha come scopo principale quello di effettuare costanti rilevazioni e monitoraggi sulla diffusione dell'italiano nel mondo e sulle 'nuove' lingue entrate nello spazio linguistico italiano. L'Italia, infatti, ha visto negli ultimi anni (ormai decenni) stanzializzarsi sul proprio territorio non solo nuovi gruppi di persone, ma soprattutto nuove lingue, al centro di dinamiche di vitalità e di visibilità linguistica che hanno dato origine a differenti forme di contatto con l'italiano. La convivenza di minoranze di antico insediamento (come lo sloveno, il franco-provenzale, le minoranze di lingua francese e tedesca della Valle d'Aosta e del Trentino Alto Adige), dell'italiano, dei dialetti e di 'nuove' minoranze (le lingue dei gruppi immigrati stanziatisi in Italia) lascia tracce sul territorio, tracce che assumono la forma di usi linguistici, di comportamenti comunicativi orali e scritti che accompagnano sempre di più la nostra vita quotidiana. Si tratta ora di raccogliere tali usi per fotografare il nuovo plurilinguismo della penisola.

Tuttavia, se la portata dell'immigrazione è stata studiata ed analizzata soprattutto dal punto di vista dell'impatto sociale ed economico che ha prodotto nel contesto di ingresso (si pensi agli annuali dossier statistici redatti dalla Caritas, dalle province e da altri enti, cfr. [9], [10], [17], [18], [19]), gli studi che si sono concentrati sull'aspetto linguistico delle lingue degli immigrati, e che non si sono soffermati solo sulle caratteristiche dell'italiano appreso dagli immigrati, ci dicono che in Italia sono entrate ad oggi almeno 130 nuove lingue: una quantità numericamente consistente (e al ribasso) di lingue che sono quotidianamente in una qualche misura presenti nelle reti di interazione sociale dello spazio linguistico italiano. Possiamo porci varie domande sui comportamenti dei parlanti e sulle conseguenze della presenza di queste 130 lingue. In particolare, quali sono le scelte linguistiche e comunicative dei loro parlanti, che sono distribuiti sul territorio nazionale a pelle di leopardo e con livelli di polarizzazione e concentrazione diversi? Chi usa tali lingue e in quali situazioni? Sono usate solo

dagli adulti o sono mantenute anche dai bambini? E ancora, quali possono essere le conseguenze della loro presenza sulle scelte linguistiche e comunicative dei parlanti nativi italiani? Le lingue immigrate sono accolte nella scuola italiana? Quale impatto può avere la presenza di queste nuove lingue nel panorama linguistico della penisola? Le indagini dell'Osservatorio senese ci aiutano a rispondere a queste domande e consentono di realizzare delle vere e proprie mappature dei territori plurilingui, attraverso l'uso di una strumentazione specifica e tecnologicamente avanzata: un Laboratorio Mobile di Rilevazione Sociolinguistica[1] [22],



Figura 1 - Laboratorio mobile.

procedure che usano foto e videocamere digitali, palmari dotati di sistema GPS, software che coniugano il supporto GIS [15] e parametri di analisi linguistica appositamente predisposti (il cosiddetto MapGeoLing 1.0.0) [2].

In queste pagine si intende riflettere sulle possibilità di raccolta di dati sulle "nuove minoranze" che sono presenti nella società italiana e in differenti contesti (mondo del lavoro, mondo della scuola ecc.) per il loro monitoraggio e analisi e per fornire indicazioni a chi opera quotidianamente in quei settori (quali ad es. la scuola) più interessati dal contatto linguistico.

A tal fine si intendono considerare e presentare le condizioni per attività di mappatura geolinguistica del territorio e di studio delle lingue immigrate in esso presenti, mappatura che può essere effettuata a partire da micro-realtà (ad es. all'interno di ogni singola scuola, quartiere ecc.) per delineare i cambiamenti dello spazio linguistico italiano, ma soprattutto per definire anche politiche di intervento.

In sintesi, le domande alle quali si tenterà di rispondere sono:

- Quante lingue si parlano in Italia? È possibile contarle, registrarle, catalogarle, fotografarle sul territorio?
- Quali sono le metodologie più adeguate per rilevare le lingue presenti e anche le lingue immigrate in un dato quartiere, città, territorio?

- Quali sono gli strumenti di più immediato uso (per aiutare chi opera nella scuola come docente, mediatore, ma anche come soggetto in primo luogo impegnato in un processo di apprendimento, cioè gli alunni stessi) per garantire una reciproca conoscenza dei patrimoni linguistici di ciascuno e un percorso in cui le lingue della scuola siano protagoniste di ogni momento dell'attività didattica e non solo?

1. Lo spazio linguistico italiano

Per poter rispondere alle domande formulate nell'introduzione è necessario ricordare alcuni concetti quali *minoranze linguistiche 'storiche'*, *stranieri/migranti/immigrati*, *lingue immigrate*, pertinenti per la definizione del quadro concettuale e operativo entro il quale possono essere svolti interventi di mappatura geolinguistica del territorio, al fine non solo di descriverne le caratteristiche, ma soprattutto di suggerire interventi mirati a una maggiore attenzione delle componenti linguistiche in esso presenti. L'attuale spazio linguistico italiano è infatti caratterizzato dal contatto tra varietà standard, regionali, dialettali, minoranze linguistiche 'storiche', 'nuove' minoranze come le lingue immigrate, forme di italiano di contatto, lingue curricolari (col predominio dell'inglese). Il contatto tra queste varietà riconfigura costantemente lo spazio linguistico, in cui dinamiche di 'forza' e di 'debolezza', di 'ricchezza' e di 'povertà' linguistica sono sempre al centro di delicati equilibri: la 'forza' dell'italiano di fronte alle lingue minoritarie, di antico e nuovo insediamento; la 'debolezza', sempre dell'italiano, di fronte all'insicurezza linguistica dei suoi parlanti; la 'ricchezza' di un patrimonio plurilingue da valorizzare e la 'debolezza' degli interventi linguistici in tal senso [21].

L'Italia si caratterizza per la presenza sul proprio territorio di minoranze linguistiche cosiddette 'storiche', diversamente tutelate e con un numero di parlanti differente. È del 1999 - n. 482 del 15 dicembre - la legge che stabilisce le *Norme in materia di tutela della minoranze linguistiche storiche*[2] stanziate su tutto il territorio nazionale e del 2000 la firma (ma non la ratifica) da parte dell'Italia della *European Charter for Regional and Minority Languages* [14]. Tali documenti stabiliscono quali debbano essere le minoranze linguistiche tutelate e affidano alle istituzioni la scelta delle modalità più adeguate per garantirne la tutela. Con queste disposizioni, tuttavia, vengono escluse le lingue immigrate, che qui assumiamo come 'nuova' minoranza, e il cui status è del tutto nuovo e oggetto di un ampio dibattito.

Parlare di tutela delle minoranze significa entrare nel campo di azione e di gestione delle politiche linguistiche europee che da alcuni anni promuovono il plurilinguismo, ma non sembrano rispondere sempre nei fatti agli intenti espressi nei documenti ufficiali, né dotare gli stati dell'Europa di disposizioni precise per l'applicazione delle indicazioni fornite. Le politiche europee in campo linguistico dovrebbero infatti incidere sulle scelte di educazione linguistica e di diffusione delle lingue nei vari paesi d'Europa, tuttavia anche i più importanti documenti del Consiglio d'Europa, in particolare il *Common European Framework of Reference for Languages: Learning, Teaching, Assessment*

[13] e della Commissione Europea [11] e, non ultima, la Costituzione Europea [12], pur promuovendo una grande apertura nei confronti delle lingue e del plurilinguismo, così come del *lifelong learning*, dello sviluppo di competenze diversificate in più lingue, sembrano fermare il loro raggio d'azione a dichiarazioni di intenti [8].

A quanto fin qui descritto viene ad aggiungersi la presenza di lingue che non godono di un riconoscimento come lingue delle "nuove minoranze", ma che vanno a modificare, in misura e forme diverse, lo spazio all'interno del quale i loro parlanti si trovano a vivere, lavorare, studiare ecc. Il primo dato da sottolineare è un dato quantitativo: le lingue di origine degli immigrati in Italia sono di gran lunga più numerose rispetto alle minoranze di antico insediamento [23]; inoltre si trovano al centro di dinamiche di vitalità, visibilità e presenza diverse rispetto alle minoranze storiche. Il secondo dato è di tipo qualitativo: avere gli strumenti per rendere pubblica la mappa delle lingue di un dato territorio risulta utile per calibrare politiche sociali, scolastiche finalizzate alla valorizzazione delle risorse linguistiche del territorio.

Risulta quindi essenziale cercare anche dei parametri in grado di distinguere queste nuove minoranze sulla base della forza esercitata dalle comunità immigrate che le parlano. Da ciò è derivata la necessità di effettuare una prima distinzione tra *lingue dei migranti* e *lingue immigrate* [5]. Queste ultime, che possiamo indicare rispetto alle lingue dei migranti come caratterizzate da scarsa fluttuazione e radicamento sociale dei propri parlanti, sono i principali soggetti di condizionamento dello spazio linguistico nel quale si trovano. Parlare di lingue immigrate necessita un continuo monitoraggio della consistenza numerica dei gruppi immigrati, della loro permanenza nel tempo in un dato territorio, della presenza dei figli a scuola, di luoghi di aggregazione, della diffusione di mezzi di comunicazione ecc.

Inoltre, l'Italia, interessata solo da pochi decenni e da meno di cinquant'anni da flussi migratori, è stata luogo di destinazione di diverse ondate migratorie che hanno creato una stratificazione dei diversi gruppi. Attualmente si parla già di gruppi 'storici' di immigrati (filippini, marocchini, cinesi) e di gruppi 'più recenti' (albanesi, rumeni, ucraini). Verificare il loro grado di insediamento e compenetrazione nel territorio serve a definire questi gruppi come immigrati e non migranti e le loro lingue come costitutive dello spazio linguistico italiano. Tali obiettivi si scontrano con alcune questioni di tipo metodologico: è necessario infatti spostare la prospettiva di analisi quantitativa dei dati numerici forniti da diversi enti che fotografano periodicamente il fenomeno immigrazione, cfr. [9], [10], [17], [18], [19] a un'analisi qualitativa relativa alla lingua, fattore spesso invocato come causa del mancato inserimento/integrazione degli immigrati, ma allo stesso tempo 'spazio' in cui si giocano contatti, conflitti, riformulazioni di identità.

Per questo motivo, onde definire lo status delle lingue immigrate, all'interno del Centro di Eccellenza è stato prodotto un impianto teorico e metodologico finalizzato allo svolgimento di vere e proprie mappature, scegliendo determinate aree ritenute paradigmatiche della distribuzione degli immigrati sul territorio italiano, non solo

per fotografare le tracce di lingue immigrate, ma per entrare nel vivo delle dinamiche presenti nei luoghi del contatto (scuole, centri di aggregazione, di volontariato, esercizi ed uffici pubblici, abitazioni ecc.). Solo in questo modo è stato possibile superare quell'approccio alla 'lingua' degli immigrati, che si limita a segnalare le difficoltà nell'imparare l'italiano, l'insuccesso scolastico dei bambini e che raramente affronta la questione del patrimonio linguistico di partenza e del suo mantenimento o perdita in seguito all'esperienza migratoria. Allo stesso modo si supera la definizione degli immigrati esclusivamente in base alla nazionalità che ha condotto alla diffusione della falsa convinzione per cui 'una nazionalità, una lingua', azzerando un patrimonio linguistico nella quasi totalità dei casi ben più ricco di quello definito dal passaporto.

2. La mappatura del territorio

Definito il quadro concettuale entro il quale operiamo, è proprio per fotografare il plurilinguismo della penisola italiana che il Centro di Eccellenza ha realizzato alcuni strumenti, ricorrendo a quelli più tradizionali, e creandone di innovativi e tecnologicamente avanzati, per rilevare la presenza delle lingue immigrate in Italia [2].

Tre sono fino ad ora i modelli costruiti per la messa a punto di un sistema di rilevazione sistematico, che possa servire da riferimento applicabile in diversi contesti:

- il modello *Toscane favelle* [4], dal titolo della sua prima applicazione, che sfrutta i dati, a disposizione nei comuni di una provincia o di un'area, sulle nazionalità in essi presenti, per effettuare una proiezione delle lingue a partire dai paesi di provenienza, in modo da ottenere una mappa, colorata in percentuale diversa a seconda delle lingue presenti. Tale procedura ha consentito di verificare l'applicazione di un modello già sperimentato per la città di Londra [7] e capace di mettere in rilievo le lingue maggiormente presenti e di fornire indicazioni agli enti locali (comuni, provincia, regione) per la promozione di interventi mirati alle popolazioni di origine straniera effettivamente presenti sul territorio.
- il modello *Monterotondo-Mentana*. Si tratta di un modello che consente la mappatura del plurilinguismo presente in contesto scolastico, attraverso la somministrazione di questionari a bambini e ragazzi italiani e di origine straniera all'interno delle classi per verificare la vitalità del patrimonio linguistico dell'area oggetto di rilevazione, in cui italiano, dialetti e lingue immigrate sono interessati da una dinamica di alternanza d'uso molto vivace, cfr. [1], [6], [16]. Le rilevazioni sono effettuate con strumenti di tipo tradizionale (questionari, audio- e videoregistrazioni), ma anche con l'uso di tecnologie avanzate come il *Laboratorio Mobile di Rilevazione Sociolinguistica*.
- il modello *Esquilino*. Si tratta della mappatura sistematica di un quartiere di una grande città (nella prima rilevazione svolta il quartiere Esquilino a Roma) per realizzare carte digitali in grado di presentare la distribuzione delle lingue

immigrate attraverso le testimonianze date dai testi della comunicazione sociale (insegne, scritte sui muri, manifesti, avvisi pubblici, pubblicità ecc.), scritti nelle diverse lingue dei gruppi immigrati in quell'area [3]. Per svolgere questo tipo di indagine è necessario definire un'area di rilevazione, e poi con l'uso di fotocamere digitali e di computer palmari, dotati di sistema GPS e software GIS (Geographic Information System, nella fattispecie ArcMap–ArcView-ESRI©), muoversi per il quartiere inserendo in un geodatabase appositamente realizzato i dati linguistici rilevati, immediatamente georefenziati. Tale procedura consente in tempi rapidi di rilevare ampie porzioni di territorio e di ottenere carte geolinguistiche interrogabili sulla base di vari criteri: lingua, tipologia e genere testuale ecc.

I tre modelli sono complementari e possono essere implementati dall'aggiunta di altri dati raccolti attraverso la registrazione audio e video delle interazioni orali fra italiani e stranieri, fra stranieri parlanti la stessa o diverse lingue, al fine di individuare gli usi linguistici nella comunicazione spontanea, le modalità e i contesti di utilizzo dell'italiano e delle altre lingue, il passaggio da un codice ad un altro.

3. Obiettivi e implicazioni dell'attività svolta a Firenze

I modelli di rilevazione presentati mostrano quanto l'armonizzazione tra tecnologie informatiche, scienze geografiche e scienze linguistiche possano permettere la raccolta di informazioni in cui i dati quantitativi e qualitativi hanno un riscontro reale e immediato sul territorio e con chi opera sul territorio. Saper riconoscere le lingue immigrate, numerose e ricche, e individuarle in una regione, una città, un quartiere può quindi diventare un obiettivo perseguibile, per favorire non solo una migliore comprensione e gestione 'linguistica' del territorio, ma per sviluppare una maggiore apertura, anche in termini di iniziative istituzionali, nei confronti di fenomeni che fanno parte ormai del panorama italiano.

In questa prospettiva si inserisce l'attività svolta presso l'Istituto Comprensivo "Gandhi" di Firenze, dove la presenza di alunni, principalmente di origine cinese, ha condotto all'attivazione (a cura del Comune di Firenze) di una serie di interventi volti a colmare la formazione in lingua italiana per chi si inserisce nel sistema scolastico italiano, ma anche ha favorito la realizzazione di progetti di valorizzazione del patrimonio plurilingue presente. L'attività con il Laboratorio Mobile di Rilevazione Sociolinguistica, una mini-rilevazione sugli usi linguistici dei ragazzi (italiani e non) ha fatto emergere il patrimonio plurilingue di ciascuno di essi e l'assunzione da parte dei singoli bambini e ragazzi di una 'quota' di patrimonio linguistico del compagno di banco. La gestione del patrimonio linguistico si realizza quindi - e ancor prima dell'insegnamento all'interno delle classi dell'italiano, dell'inglese - attraverso il contatto quotidiano tra 'portavoce' privilegiati di diverse lingue.

D'altra parte, proprio il Ministero della Pubblica Istruzione, nel suo rapporto annuale sugli *alunni di cittadinanza non italiana* [20], è il primo a fornire una panoramica sulla

presenza e sulla distribuzione degli alunni stranieri sul territorio italiano. I dati, seppur importanti, non hanno però la precisione di delineare l'effettiva varietà di lingue, di situazioni di contatto di ogni scuola, di ogni città, dove l'apporto di un surplus di plurilinguismo non proviene solo dagli alunni definiti stranieri, ma anche dagli stessi alunni italiani. Risulta quindi necessario promuovere ricerche e iniziative, che anche con il supporto di strumenti di alta tecnologia, possano sottolineare e mostrare il ruolo e il peso che le 'nuove' minoranze linguistiche, definite dall'appartenenza a gruppi di immigrati stanziati sul territorio e pertanto 'lingue immigrate', svolgono nel rideterminare il contatto e rapporto tra docente-alunno e tra alunni, e verificare in quale modo si realizzano le dinamiche di mediazione, sotto quale forma e con quali caratteristiche. La scuola italiana, infatti, si connota come l'ambiente in cui si insegna l'italiano - e alcune lingue minoritarie storiche, secondo le disposizioni specifiche di alcune regioni - e le lingue di diffusione internazionale, con il predominio dell'inglese.

La percezione del peso delle lingue minoritarie nello spazio linguistico della scuola è una variabile non considerata, o ritenuta marginale, in ogni caso esclusa talvolta dalle scelte programmatiche di insegnamento delle lingue. Le nuove lingue minoritarie rivestono invece un ruolo specifico nello sviluppo dell'identità linguistico-culturale di un alunno che si trasferisce da un paese in un altro o nasce in Italia in un famiglia plurilingue, ruolo che è necessario conoscere soprattutto nell'ambiente che maggiormente dovrebbe mostrarsi attento alla ricchezza del patrimonio linguistico dei propri alunni.

4. Conclusioni

L'attività svolta presso l'Istituto Comprensivo 'Gandhi' ha messo in luce quanto l'attenzione al plurilinguismo debba essere un fattore costitutivo dell'ambiente scolastico, dove accanto all'italiano e alle altre lingue previste come materie di insegnamento si possano prevedere, per tutti gli alunni e non solo per quelli stranieri, degli spazi "liberi" in cui valorizzare il proprio patrimonio linguistico, il proprio *continuum* di codici che va da varietà dialettali/regionali, all'italiano di contatto, all'italiano standard, alle lingue della scuola, alle lingue portate nella scuola. Questo per evitare che si mantenga una percezione di distanza da parte dagli italofoni nei confronti delle lingue che entrano nella scuola, non dai programmi, ma dalle bocche dei bambini e dei ragazzi, di tutti i bambini e ragazzi.

A questo scopo i modelli di rilevazione sperimentati dal Centro di Eccellenza senese e il supporto tecnologico che essi sfruttano possono risultare un valido strumento per definire e misurare il potenziale peso delle lingue e gli usi linguistici effettivi di un territorio.

NOTE

[1] Si tratta di un mezzo speciale (un camper) in grado di consentire un'elaborazione immediata dei dati linguistici registrati in un territorio e di abbinarli alle caratteristiche stesse di quel luogo. La struttura del *Laboratorio*, diviso in due ambienti distinti, permette di trattare i dati in un ambiente e contemporaneamente svolgere interviste, registrazioni nell'altro.

[2] Art. 1

1. La lingua ufficiale della Repubblica è l'italiano.
2. La Repubblica, che valorizza il patrimonio linguistico e culturale della lingua italiana, promuove altresì la valorizzazione delle lingue e delle culture tutelate dalla presente legge.

Art. 2

1. In attuazione dell'articolo 6 della Costituzione e in armonia con i princìpi generali stabiliti dagli organismi europei e internazionali, la Repubblica tutela la lingua e la cultura delle popolazioni albanesi, catalane, germaniche, greche, slovene e croate e di quelle parlanti il francese, il franco-provenzale, il friulano, il ladino, l'occitano e il sardo.

Bibliografia

[1] Bagna C., Barni M., *Spazi e lingue condivise. Il contatto fra l'italiano e le lingue degli immigrati: percezioni, dichiarazioni d'uso e usi reali. Il caso di Monterotondo e Mentana*. In: C. Guardiano, E. Calaresu, C. Robustelli, A. Carli (a cura di), 2005, *Lingue, Istituzioni, Territori*. Atti del XXXVIII Congresso Internazionale di Studi della Società di Linguistica Italiana, Modena 23-25 settembre 2004, Bulzoni, Roma 2005, pp. 223-251.

[2] Bagna C., Barni M., *Dai dati statistici ai dati geolinguistici. Per una mappatura del nuovo plurilinguismo. SILTA*, XXXIV, 2, 2005, pp. 329-355.

[3] Bagna C., Barni M., *Per una mappatura dei repertori linguistici urbani: nuovi strumenti e metodologie*. In: De Blasi N., C. Marcato C., *La città e le sue lingue. Repertori linguistici urbani*. Liguori, Napoli 2007.

[4] Bagna C., Barni M., Siebetcheu R., *Toscane favelle. Lingue immigrate nella provincia di Siena*, Collana dell'Osservatorio linguistico permanente dell'italiano diffuso fra straniere e delle lingue immigrate in Italia, Guerra, Perugia 2004.

[5] Bagna C., Machetti S., Vedovelli M., *Italiano e lingue immigrate: verso un plurilinguismo consapevole o verso varietà di contatto?* In: A. Valentini, P. Molinelli, P. Cuzzolin, G. Bernini (a cura di), 2003, *Ecologia linguistica,* Atti del XXXVI Congresso Internazionale di Studi della Società di Linguistica Italiana, Bergamo 26-28 settembre 2002, Bulzoni, Roma 2003, pp. 201-222.

[6] Bagna C., Pallassini A., *Nativi e non-nativi a confronto: tra percezione dell'italiano e mediazione linguistico-culturale*. In: E. Banfi, L. Gavioli, M. Vedovelli, C. Guardiano (a cura di), *I problemi e i fenomeni di mediazione linguistica e interculturale.* Atti del V Congresso AITLA, Bari 17-18 febbraio 2005, Guerra, Perugia 2006, pp. 197-219.

[7] Baker P., Eversley J., *Multilingual Capital. The Languages of London's Schoolchildren and their Relevance to Economic, Social and Educational Policies*. Battlebridge Publications, Londra 2000.

[8] Barni M., Machetti S., *La politica linguistica europea e il contatto linguistico: problemi teorici e applicativi*. In: E. Banfi, L. Gavioli, M. Vedovelli, C. Guardiano (a cura di), 2006, *I problemi e i fenomeni di mediazione linguistica e interculturale.* Atti del V Congresso AITLA, Bari 17-18 febbraio 2005, Guerra, Perugia 2006, pp. 89-111.

[9] Caritas, *Immigrazione. Dossier statistico 2006,* Idos, Roma 2006.

[10] CNEL, *Indici di integrazione degli immigrati in Italia. IV Rapporto*, Cnel, Roma 2006.

[11] Commission des Communautés Européennes, *Promovoir l'apprentissage des langues et de la diversite linquistique: un plan d'action,* http://www.europa.eu.int/com/education/policies/lang/policy/index_fr.html, 2003.

[12] Costituzione Europea http://www.governo.it/costituzione_europea/index_costituzione.html, 2004.

[13] Council of Europe, *Common European Framework of Reference for Languages:*

Learning, Teaching, Assessment, Modern Language Division, Strasbourg, Cambridge University Press, Cambridge 2001; trad. it.: Consiglio d'Europa, *Quadro comune europeo di riferimento per le lingue: apprendimento, insegnamento, valutazione,* a cura di D. Bertocchi, F. Quartapelle, RCS Scuola, La Nuova Italia, Milano – Firenze 2002.

[14] Dell'Aquila V., Iannaccàro G., *La pianificazione linguistica*, Carocci, Roma 2004.

[15] ESRI®, *ArcMap – ArcView 8.3*, ESRI®, 2003.

[16] Extra G., Yağmur K. (a cura di), *Urban multilingualism in Europe. Immigrant minority languages at home and school*, Multilingual Matters, Clevedon 2004.

[17] ISMU, *XII Rapporto sulle migrazioni,* Fondazione ISMU, Milano 2007.

[18] ISTAT, *Gli stranieri residenti in famiglia e in convivenza*, ISTAT, Roma 2004.

[19] ISTAT, *La popolazione straniera residente in Italia al 1° gennaio 2006,* ISTAT, Roma 2006.

[20] Ministero della Pubblica istruzione, *Alunni con cittadinanza non italiana (anno scolastico 2005-2006)*, MPI, Roma 2006.

[21] Vedovelli M., *Non si vive un'economia, si vive una lingua.* In P. Ciocca, G. Toniolo (a cura di), *Storia economica d'Italia, 3. Industrie, mercati, istituzioni, 2. I vincoli e le opportunità,* Laterza, Roma-Bari 2003, pp. 589-623.

[22] Vedovelli M., *L'Osservatorio linguistico permanente dell'italiano diffuso fra straniere e delle lingue immigrate in Italia. Il Laboratorio Mobile di Rilevazione Sociolinguistica*. In: *Plurilinguismo. Contatti di lingue e di culture* 10, 2003, pp. 245-248.

[23] Vedovelli M., Villarini A., *Le lingue straniere immigrate in Italia*. In: Caritas, *Immigrazione. Dossier statistico 2001,* Anterem, Roma 2001, pp. 222-229.

La progettazione eco-sostenibile di un nuovo quartiere: il progetto europeo Ecocity

Massimo Bastiani

Facoltà di Architettura, Università di Roma 'La Sapienza'

L'utopia oggi appare un'eresia perché nel mondo
regna un ideologia del presente e dell'evidenza che
sembra rendere obsoleti sia le lezioni del passato
sia il desiderio d'immaginare l'avvenire

Marc Augé

La città contemporanea ha perduto progressivamente il suo disegno ambientalmente consapevole fino a sostituirlo con un modello pianificatorio, orientato alla dispersione delle risorse ed all'elevato costo energetico.

La crisi di identità delle città contemporanee sempre più intese come aggregazioni urbane addizionali e dilaganti dai centri storici verso le periferie, e poi dalle prime verso le seconde fasce periferiche, ha prodotto il risultato che le strutture antropiche non sono mai state come in epoca moderna così oppositive al contesto naturale.

Questo modello di sviluppo pone i limiti come segni di sconfitta anche se abbiamo sempre maggiori problemi a individuare fonti energetiche disponibili e sempre maggiori difficoltà a trovare luoghi dove avere una elevata qualità della vita. In realtà stentiamo ad assumere la consapevolezza della crisi di questo modello di sviluppo ed a adottare le relative correzioni.

Verso il contesto ambientale delle città sempre più prevale l'ideologia di trovarsi di fronte a luoghi da conquistare, sfruttare e dominare, come se i problemi interni della città potessero risolversi esclusivamente con l'offerta tecnologica e il sovraconsumo.

Le aggregazioni urbane derivate si intersecano senza ambire a una *forma urbis* o ad una coscienza ambientale; di fatto cancellano l'idea stessa di città come è stata storicamente concepita. L'urbanizzazione diffusa su tutto il territorio, in assenza di limiti, si muove incontrollata all'interno del paesaggio ambientale residuale e del paesaggio agricolo che, se continua così, nei prossimi 10 o 20 anni vedrà nell'intera Europa un terzo delle superfici abbandonate.

In questo contesto, l'organizzazione del sistema della mobilità in ambito urbano soffre di una pianificazione e programmazione legata alla logica dei parcheggi e delle strade carrabili, con il risultato che in Italia vi sono 103 auto circolanti per chilometro di strada (con una velocità media nelle grandi città di 16 km/h, 2 in meno rispetto al 2001), contro le 65 circolanti in Germania, le 57 in Gran Bretagna e le 29 in Francia.

Il settore dei trasporti è altresì responsabile del 22,71 % dei consumi energetici italiani che se sommato a quello del terziario e del residenziale, dà una quota pari al 45,31% (fonte ENEA, 2004). L'Italia ha, in percentuale sulla popolazione, il maggior numero di auto circolanti del mondo con 58,1 vetture ogni cento abitanti.

Nella necessità di considerare per il nostro futuro più prossimo una riappropriazione delle città ed un miglioramento della qualità della vita dei suoi abitanti, l'indirizzo da perseguire è quello di un progressivo cambiamento del modello di gestione e pianificazione della città, che conduca ad una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni prodotte e ad una mobilità sostenibile.

Con questa finalità è stato ideato il Progetto Europeo *Ecocity*, Urban Development towards Appropriate Structures for Sustainable Transport, http://www.ecocityprojects.net, supportato dalla Commissione Europea – DG Energy. Attraverso *Ecocity* si è inteso sperimentare una pianificazione finalizzata alla riconversione di ambiti urbani a partire dal sistema della mobilità sostenibile, fino a giungere alla progettazione di edifici a basso impatto ambientale e con consumi energetici controllati, con il fine di aumentare gli standard di qualità e di comfort degli abitanti.

Questo programma ha coinvolto, per circa due anni, trenta partner provenienti da sette diversi paesi europei che si sono concentrati su cinque ambiti urbani. Il partenariato nazionale oltre ad Ecoazioni ha compreso la PRAU (coordinatore nazionale) e l'Agenzia per l'Energia e L'Ambiente della Provincia di Perugia.

L'approccio metodologico al progetto si è basato sulla filosofia degli «studi sulla città» che sono stati il contributo italiano dagli anni '50 in poi per il recupero urbano della nostra edilizia storica e monumentale. In particolare ha fatto riferimento all'approccio specifico della Scuola Romana di S. Muratori e G. Caniggia che definiva la città come «un complesso organismo olistico autogenerantesi in un costante processo evolutivo nell' uso, nella tipologia e nella forma». La sua logica evoluzione studia le strette relazioni tra contesto naturale ed ambientale, la storia ed il progetto delle strutture dell'uomo, analizzando le matrici che hanno da sempre condizionato le scelte, le localizzazioni ed il disegno morfologico della città; e ricerca le regole e la metodologia, i sistemi, i magisteri, le tecniche dell'equilibrio ambientale-climatico della città storica con l'obiettivo di riproporre una progettazione possibile e sostenibile come logica continuazione del suo stesso processo evolutivo.

La città italiana in cui si è intervenuti è Umbertide, un centro di 15.000 abitanti che si trova nella provincia di Perugia, da anni attivo nella promozione della sostenibilità attraverso il processo di A21 locale e con una solida tradizione nella promozione delle energie rinnovabili. L'area prescelta per il progetto è chiusa tra il tracciato ferroviario e il parco del fiume Tevere e definisce un ambito urbano irrisolto in cui più funzioni si sovrappongono confusamente.

Il progetto intende fornire soluzioni integrate che possano incidere contemporaneamente sulla qualità urbanistica e architettonica ma anche sui consumi energetici sul comfort e sulla mobilità sostenibile.

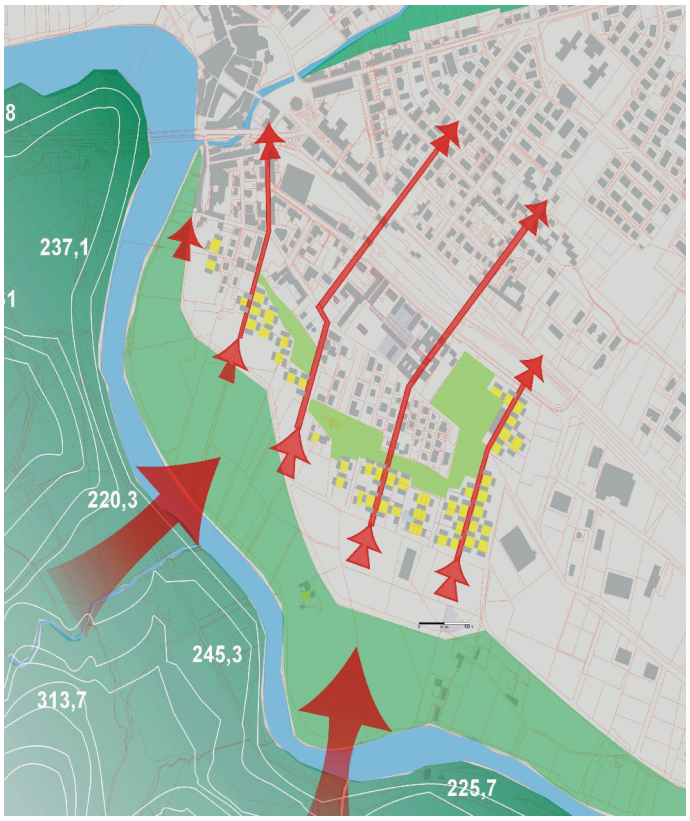


Figura 1 - Microclima e forma urbana.

Il nuovo quartiere residenziale derivato dal progetto rispetta il carattere della città esistente anche a livello di densità insediativa. Le altezze degli edifici, il numero dei piani (3-4), la tipologia degli alloggi e degli organismi edilizi, che costituiscono le caratteristiche fondamentali della morfologia e della densità della città antica, sono state assunte come elementi di riferimento della continuità del processo evolutivo urbano. Il nuovo progetto si inserisce in questo processo, ottimizzando, con strumenti sofisticati come la « simulazione di calcolo fluidodinamica», i limiti delle dimensioni e della forma del proprio tessuto edilizio e della relativa densità in relazione alle prestazioni del migliore «comfort bioclimatico».

Per quanto concerne il sistema della mobilità l'obiettivo del progetto è stato quello di tracciare una struttura innovativa e appropriata per la mobilità sia a livello di quartiere ma in grado di produrre ripercussioni positive sulla città e sul suo territorio. Attualmente ad Umbertide l'80% della popolazione usa la propria automobile per spostarsi sia in città che nel suo territorio. Per il progetto del nuovo quartiere urbano si è previsto di passare gradualmente dallo 'scenario attuale' ad uno 'scenario a breve termine' con una modalità carrabile ridotta e controllata (50% automobile privata, 20% treno, 20% mezzi pubblici, 20% pedoni e bicicletta) per passare poi allo 'scenario a lungo termine' scelto dai cittadini attraverso la partecipazione (50% treno, 30% mezzi pubblici,20% pedoni e bicicletta).

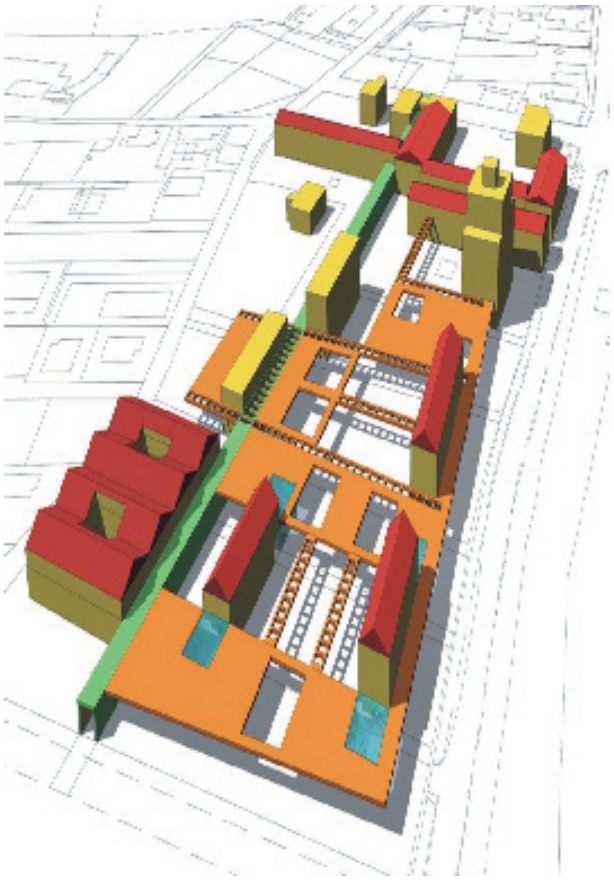


Figura 2 - La nuova stazione ferroviaria della FCU.

La prima operazione è stata quella di proporre e di concordare con le istituzioni ed i cittadini una riconversione dell'attuale Ferrovia Centrale Umbra (FCU) in una efficiente metropolitana leggera che interconnettesse rapidamente l'asse portante della vitale economia dell'Alta Valle del Tevere alla rete ferroviaria nazionale e internazionale, a nord attraverso il nodo della città di Arezzo e a sud con quello passante per la città di Perugia.

La seconda operazione è stata l'aumento delle frequenze delle corse giornaliere per i passeggeri ed il ripristino dell'importante funzione del trasporto delle merci con una stazione totalmente dedicata al carico e scarico nel Comune di Pierantonio.

La ricostruzione della doppia stazione centrale esistente di Umbertide è stata portata a termine in modo da convertirla in una «struttura a ponte» multifunzionale, con il ruolo di fungere da centro del nuovo quartiere, ma anche come importante tramite per il collegamento tra il Parco Naturale del Tevere, la città medievale e quella moderna.

La mobilità alternativa diviene struttura portante del nuovo quartiere. Perché l'operazione non diventasse solo un esperimento momentaneo, ma invece una pratica duratura nel tempo, il progetto ha tenuto conto dei valori estetici e di attrazione collettiva delle strutture delegate alla mobilità alternativa. Per lasciare a casa o nei

parcheggi periferici il proprio feticcio del secolo, l'automobile privata, anche in Umbria il cittadino deve trovare validi ragioni. Il microclima locale gioca certamente a favore di queste motivazioni. D'estate le automobili diventano un forno e per piccoli tragitti neanche l'aria condizionata riesce a raffrescarle, mentre passeggiare in un viale alberato con il fresco del vento e del ruscello d'acqua è certamente più piacevole e salutare.

Lo schema della mobilità è stato studiato con attenzione e il parametro del «comfort urbano» ha avuto un ruolo fondamentale. La circolazione all'interno del quartiere diventa strettamente legata a, e coerente con, il disegno bioclimatico della struttura urbanistica ed edilizia dell'area. Viene suddivisa in due diverse tipologie di fruizione: la prima comprende i «percorsi e gli spazi mentalmente chiusi» più veloci, tipici delle persone che hanno fretta, chiuse nelle proprie automobili o sulle motociclette e sulle piste ciclabili, e non hanno tempo per comunicare; la seconda invece si articola nei «percorsi e spazi mentalmente aperti» più flessibili, disegnati per la sosta o per modalità lente come il passeggiare in un parco, aperti a varie funzioni, come lo shopping, e alla 'comunicazione' delle piazze cittadine, dei vicoli commerciali, dei luoghi d'incontro, dei caffè, delle pizzerie, dei giardini urbani, dello sport, dei giochi per i bambini.

La circolazione della prima tipologia dedicata alla mobilità più veloce dei servizi pubblici (autobus, treno, servizi logistici, parcheggi di scambio e di quartiere, automobili e motociclette private, piste ciclabili veloci ecc.) è organizzata lungo un anello circolare esterno al quartiere, ove l'efficienza bioclimatica è molto meno importante.

All'articolazione della seconda tipologia molto più complessa, «degli spazi e percorsi mentalmente aperti», è stata dedicata maggior cura e attenzione. Essa è stata organizzata lungo gli assi nord-sud delle «spine bioclimatiche» e dei «corridoi del vento» nella fruibilità passante delle «corti condominiali», per giungere allo spazio più grande e flessibile del «salotto verde urbano» posto in posizione trasversale, ma in cui gli spazi funzionali trovano condizioni bioclimatiche ottimali in tutte le stagioni. Questi ultimi spazi sono architettonicamente molto curati: in particolare il sistema dei percorsi delle spine bioclimatiche, delle corti condominiali attrezzate passanti e del «salotto verde», sono trattati come un unico insieme di elementi di un lungo parco urbano, che riunisce angoli protetti e ventilati, dove i particolari costruttivi, delle pavimentazioni e degli arredi sono in sintonia con la migliore «qualità estetica e del comfort urbano» in maniera da renderne più piacevole possibile la fruibilità.

Gli aspetti legati alle funzioni urbane presenti nel nuovo quartiere sono affidate ad una prevalenza di «uso misto» (*mixed use*). Esse non hanno collocazioni 'isolate', salvo per funzioni specialistiche come la scuola, la stazione o le strutture ex-industriali come l'antico molino, ma sono integrate nel tessuto dell'edilizia residenziale, soprattutto in alcune 'corti' che si attestano in particolari posizioni nodali delle spine e dei corridoi bioclimatici o della più grande articolazione del salotto verde urbano e costituiscono un'ulteriore rete per la fruizione pedonale e ciclabile all'interno dei piani-terra coperti passanti e degli spazi esterni, resi pubblici privati, delle tipologie ad atrio.



Figura 3 - Abitazioni bioclimatiche a «corte».

Gli interventi su scala urbana riguardano:

- la realizzazione degli insediamenti in grado di migliorare le condizioni di ventilazione, in base alla direzione dei venti prevalenti nelle diverse condizioni stagionali, per ottenere una protezione dai venti invernali (disponendo dei filari di alberi) ed incentivare invece la penetrazione dei venti estivi riducendo di conseguenza i fabbisogni energetici degli edifici;
- l'adozione di un impianto di teleriscaldamento a biomassa, utilizzando energia rinnovabile e riducendo i consumi energetici di energia fossile;
- l'esposizione prevalente degli edifici di nuova costruzione a sud, al fine di massimizzare la captazione dell'energia solare per il riscaldamento solare passivo;
- l'opportuna distanza tra gli edifici, compatibilmente con la volumetria degli edifici stessi imposta dal piano regolatore locale.

Al fine di migliorare le condizioni microclimatiche, nelle due principali situazioni stagionali, sono state realizzate le seguenti soluzioni:

- nel periodo invernale, in cui il vento proviene prevalentemente da nord, al fine di proteggere l'area in esame sono stati disposti dei filari di alberi nella parte alta dell'intervento;
- nel periodo estivo, in cui il vento proviene prevalentemente da sud, la disposizione degli edifici (orientati con la facciata prevalente a sud per la captazione solare) a corti aperte e la realizzazione di corridoi bioclimatici consentono di avere un soddisfacente grado di penetrazione dei venti nell'interno dell'area stessa;
- realizzazione di alberature, laghetti e corsi d'acqua consentono, per effetto dell'evaporazione dell'acqua ed evapo-traspirazione delle piante, di migliorare

le condizioni del microclima locale, influenzando anche positivamente la riduzione dei fabbisogni energetici degli edifici.

Per quanto riguarda i «corridoi bioclimatici», essi presentano la caratteristica di convogliare i venti dominanti estivi in quanto sono orientati parallelamente alla loro direzione. La presenza del corridoio produce un effetto di turbolenza nelle vie laterali che dà luogo a un effetto di depressione, con conseguente trascinamento dell'aria circostante. Il sistema delle 'corti' aperte dà luogo a un regime di interferenza tra le scie dei diversi edifici, che produce un effetto di movimentazione dell'aria nelle corti stesse, rendendo particolarmente favorevole il comfort estivo.

Tale sistema consente dunque di migliorare il comfort ambientale nel periodo estivo ed è in grado di far assumere all'ambiente urbano l'aspetto di un grande salotto verde, fermo restando che, nel periodo invernale, si risentono positivamente gli effetti di protezione dai venti freddi (grazie ad orientamento e alberature adottate).
Per quanto riguarda la parte bioclimatico/impiantistica, gli interventi proposti hanno lo scopo di contenere i consumi energetici, migliorare il comfort ambientale (dell'ambiente esterno e di quello interno agli edifici) e ridurre l'inquinamento ambientale. Tali interventi si distinguono in due tipologie di azione, come indicato di seguito.

1. Per gli edifici esistenti, gli interventi riguardano:

- la conservazione dell'energia (grado di isolamento e partecipazione termica) controllo dei fenomeni di condensazione, ponti termici ed il rapporto infiltrazione/ricambi d'aria;
- il riscaldamento solare passivo (sistemi diretti e separati);
- il raffreddamento passivo (protezione dall'irraggiamento solare, inerzia termica, ventilazione naturale, cessione radiativa notturna ed evaporazione);
- l'illuminazione naturale (dimensionamento e posizionamento delle superfici trasparenti, utilizzo di sistemi di riflessione e canalizzazione della luce;
- fotovoltaico (integrazione di elementi fotovoltaici sulla copertura degli edifici).

2. Per i nuovi edifici, gli interventi riguardano:

- conservazione dell'energia – adozione di pareti ventilate (pareti e coperture con isolamento a cappotto con antistante, verso l'esterno, intercapedine ventilata); utilizzo di doppi vetri basso-emissivi e telai in legno;
- l'utilizzazione, per le facciate a sud, di due sistemi solari passivi, dei quali uno di tipo diretto per il riscaldamento degli ambienti esposti a sud e uno di tipo separato con un sistema a *loop* convettivo, in grado di realizzare sia il riscaldamento degli ambienti a nord sia la ventilazione naturale in tutti gli ambienti;

- la realizzazione di elementi di ostruzione/riflessione dalla parte esterna delle vetrate a sud, in grado di schermare dalla radiazione solare nel periodo caldo, riflettere la radiazione solare sul soffitto nel periodo freddo, facendo funzionare il soffitto come elemento di accumulo termico (per la radiazione assorbita), e riflettere la rimanente parte della radiazione solare per realizzare una illuminazione naturale uniforme senza fenomeni di abbagliamento.

Il ruolo della partecipazione è stato determinante nel progetto *Ecocity*. Senza il contributo dei cittadini, veri fruitori della città, ed il sostegno degli attori economici ed amministrativi locali, molte scelte innovative non sarebbero state possibili e soprattutto credibili. Il lavoro collettivo del processo di partecipazione, che si è articolato attraverso l'attivazione di laboratori partecipati, sono stati prima selezionati gli indicatori che hanno dato le regole del processo e successivamente si sono progettate e definite le scelte progettuali.



Figura 4 - Laboratori di progettazione partecipata.

La progettazione partecipata ha avuto importanti ricadute sul progetto sia sotto il profilo tecnico (ad esempio, per l'ipotesi anche dimensionale dell'impianto di teleriscaldamento a biomassa che è stato deciso che alimenterà il nuovo quartiere), sia sotto il profilo funzionale (con la scelta delle destinazioni d'uso) sia sotto il profilo amministrativo e gestionale, con l'adeguamento del nuovo PRG del Comune e l'apertura della società FCU (Ferrovia Centrale Umbra) a seguire i concetti e le strategie del progetto nelle scelte di mobilità sostenibile. A questo proposito il maggiore risultato è consistito certamente nella disponibilità e nel contributo dei cittadini alle istanze concettuali generali di *Ecocity*.

Il progetto del Piano urbanistico ed edilizio per la città di Umbertide è stato nel suo complesso una splendida occasione per la creazione di un dialogo tra professionisti del programma *Ecocity*, tecnici locali, dirigenti dell'Amministrazione, politici, attori economici e cittadini. Le reazioni positive a tale operazione hanno fatto emergere quanto sia penetrata la consapevolezza e l'attenzione per le problematiche microclimatiche, dell'energia e della mobilità, dando il necessario impulso ad articolare e definire le

soluzioni conclusive nella maniera più innovativa.

L'innovazione è stata quella di aver centrato l'attenzione sull'aspetto del 'raffrescamento', oggi sempre più necessario alla luce dei grandi cambiamenti climatici, in atto ovunque e non solo nei paesi considerati tropicali.

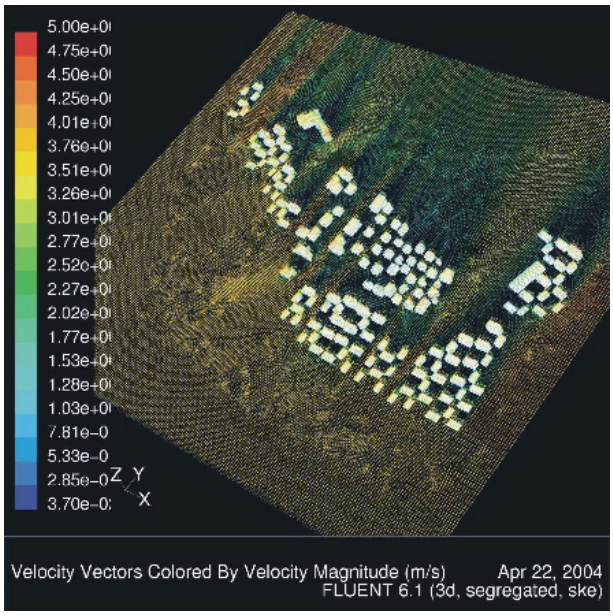


Figura 5 - Valutazione fluidodinamica del livello urbanistico.

L'aspetto del raffrescamento è stato affrontato non solo negli spazi interni degli edifici con sistemi solari passivi e ventilazione naturale, ma soprattutto negli spazi esterni a livello di isolato e di tessuto urbano, coinvolgendo e modificando profondamente l'attuale disciplina dell'urbanistica convenzionale e i metodi di calcolo delle simulazioni fino ad ora adottate.

BIBLIOGRAFIA

[1] Gaffron P. Huismans G. Skala F., *Book 1, Ecocity. A better place to live - Urban development towards Apropriate Structures for Sustainable Transport*. European Commission DG Research, 2005

[2] Sartogo F. Calderaro V., 'Comfort Urbano' e 'Mobilità Sostenibile' come nuova cultura per la progettazione della città. Rapporto finale WP11. Progetto *Ecocity*, European Commission DG Research 2002-2004.

La progettazione di un complesso residenziale ad alto risparmio energetico: il centro residenziale Sesto Ricasoli

Marco Margheri

Costruzioni Margheri

La Costruzioni Margheri, società dell'omonimo Gruppo che opera nel settore edilizio fiorentino da vari decenni, già da alcuni anni si è posta il problema di come operare una decisa riduzione dei consumi nelle proprie costruzioni, nella considerazione che gli attuali problemi energetici ed ambientali richiedono un deciso cambiamento in tutti i settori di vita rispetto al recente passato, che non è eticamente più possibile ignorare.

Proprio per questo, a partire dai tre precedenti interventi residenziali realizzati dalla società, sono stati introdotti alcuni particolari accorgimenti (come la reintroduzione del riscaldamento centralizzato ed i pannelli solari per l'acqua calda sanitaria) volti proprio a migliorare il rendimento energetico delle abitazioni, che i relativi studi definiscono come uno tra i maggiori responsabili dei guasti attuali. L'intervento di Sesto Fiorentino, attualmente costituisce perciò il punto più avanzato di tale ricerca, ponendosi come futuro elemento di paragone nel panorama edilizio fiorentino.

Il progetto del Centro Residenziale Sesto Ricasoli prevede la realizzazione di un complesso residenziale costituito da 184 appartamenti «classe A» e di 8 appartamenti «A *free*» in un'area posta nel comune di Sesto Fiorentino. A costruzione avvenuta esso costituirà il più grande intervento residenziale in Italia in classe «A», secondo la certificazione energetica prevista dal D. lgs. 192/2005 e successive modifiche, ovvero con un consumo per riscaldamento invernale e raffrescamento estivo non superiore a 30 kw/h anno.

Questo intervento, dalle dimensioni finora inusitate per edifici di questo tipo, presenterà anche un ulteriore elemento di distinzione all'interno del panorama costruttivo italiano. Infatti la realizzazione di edifici ad alta efficienza energetica, finora quasi esclusivamente limitata alle regioni del nord Europa ed, in Italia, alla Provincia Autonoma del Trentino Alto Adige, alle nostre latitudini è complicata dal fatto che non è possibile limitarsi a prevedere elevate prestazioni dell'involucro murario riguardo al comportamento invernale, ma è necessario considerare, con la stessa importanza, anche la climatizzazione estiva, principale causa dei picchi annuali di consumo elettrico.

Le diverse esigenze legate al riscaldamento invernale ed al raffrescamento estivo talvolta possono anche avere esigenze contrastanti, fatto questo che ha contribuito

a limitare la diffusione di tali edifici in quanto facilmente risolvibili solo attraverso complicate e costose soluzioni impiantistiche e tecnologiche utilizzabili soltanto da utenti facoltosi e particolarmente sensibili ai problemi ambientali. Con il Centro Residenziale Sesto Ricasoli sono state studiate delle soluzioni che permettono di risolvere tali esigenze in modo efficace ma senza grossi aggravi di spesa, in modo tale che gli alloggi potranno essere immessi regolarmente sul mercato a prezzi concorrenziali.

In aggiunta a tutto ciò otto alloggi, ubicati in un apposito edificio distinto dagli altri, sono stati progettati con soluzioni ancora più spinte, in modo da ottenere una costruzione denominata «A *free*», ovvero energeticamente autosufficiente. Anche questo edificio costituisce una assoluta novità per il centro Italia, in quanto riesce ad estendere il concetto della casa passiva, utilizzato normalmente in costruzioni unifamiliari, a scala condominiale, permettendo così ai suoi futuri inquilini di non utilizzare alcuna energia esterna. Tale progetto, al contrario delle abitazioni di «classe A», utilizza le più avanzate tecnologie e tecniche oggi disponibili nel campo delle costruzioni, assolutamente indispensabili per raggiungere tali risultati.

Questi eccezionali risultati sono stati ottenuti tramite la messa a punto di un insieme coordinato di soluzioni, il cui studio ha impiegato per vari mesi un pool di progettisti composto, oltre che dai tecnici della società, da ricercatori della Facoltà di Architettura di Firenze - Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design 'P. Spadolini', da studi professionali esterni specializzati nel campo impiantistico – progettuale, e dall'attiva collaborazione degli studi tecnici di alcune società produttrici di materiali, che hanno anche messo a punto prodotti specifici.

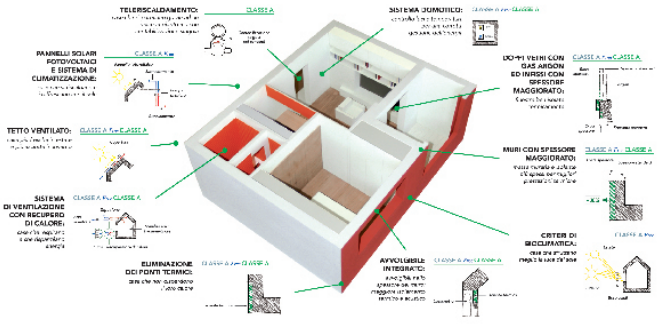

TELERISCALDAMENTO:
SISTEMA GIUNOTTICO:
PANNELLI SOLARI FOTOVOLTAICI E SISTEMA DI CLIMATIZZAZIONE:
DOPPI VETRI CON GAS ARGON ED INFISSI CON SPESSORE MAGGIORATO:
TETTO VENTILATO:
MURI CON SPESSORE MAGGIORATO:
SISTEMA DI VENTILAZIONE CON RECUPERO DI CALORE:
CAPTER DI RECUPERATORE:
ELIMINAZIONE DEI PONTI TERMICI:
AVVOLGIBILE INTEGRATO:

Figura 1 - Rappresentazione degli elementi messi a punto dal team di progettisti.

Gli elementi principali del progetto possono essere schematizzati nei seguenti punti, che descrivono i vari ambiti di intervento in cui si è maggiormente soffermata l'attenzione del gruppo dei progettisti.

- ELIMINAZIONE DEI PONTI TERMICI. Grazie al rivestimento esterno 'a cappotto' con l'uso di adeguati materiali isolanti in corrispondenza delle strutture portanti dell'edificio, si è impedito ogni possibile passaggio di calore all'esterno nelle zone delle strutture portanti, che costituiscono le parti più deboli nell'isolamento termico dell'edificio;

- Avvolgibile integrato. L'utilizzo di speciali avvolgibili a rotazione opposta a quelli tradizionali, permette di integrare completamente i cassonetti nello spessore murario, riducendo così sia le dispersioni di calore che di rumore;
- Doppi vetri con gas argon ed infissi di spessore maggiorato**.** L'uso combinato di vetrocamera con questo specifico gas al suo interno, e di maggiori spessori del legno costituente l'infisso rispetto ad uno tradizionale permette di ridurre considerevolmente la dispersione in questo punto debole dell'involucro murario. Inoltre la vetratura, essendo del tipo stratificato, riduce sensibilmente anche il pericolo di infortuni da rottura;
- Muri con spessore maggiorato del 30%. Aumentando lo spessore delle murature esterne è stato possibile sia aumentare la massa, incrementando così l'inerzia termica utile per il comportamento estivo, ed aumentare lo spessore di isolante al suo interno, normalmente presente in spessori ridotti a causa anche del ridotto spazio esistente. Per il laterizio sono stati scelti blocchi porizzati, proprio per aumentare il più possibile la massa;
- Progettazione con criteri bioclimatici. Per l'edificio «A Free» molta attenzione da parte dei progettisti è stata posta nell'ottimizzazione della forma architettonica, in modo da permettere di sfruttare ogni possibile beneficio da parte dell'esposizione solare e, nel contempo, di ridurre gli svantaggi. Per questo le finestre sono state previste prevalentemente negli ambienti a sud, dove saranno collocati tutti gli ambienti di vita, mentre è stato studiato un apposito sistema di schermature che, mentre lascerà passare i raggi solari nel periodo invernale, schermerà le superfici vetrate da quelli estivi. Negli altri lati sono invece presenti solo le aperture strettamente necessarie agli ambienti di servizio, come bagni e corridoi.

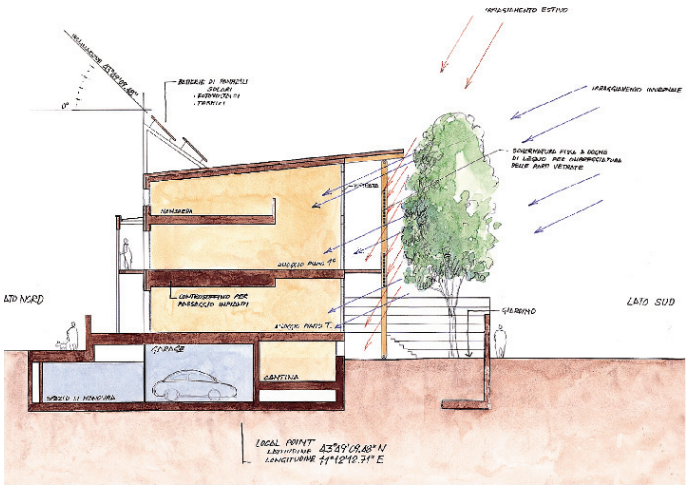


Figura 2 - Sezione dell'edificio «A-free».

- SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANICA CON RECUPERO DI CALORE. L'utilizzo di un sistema di Ventilazione Meccanica Controllata, già largamente in uso in alcuni paesi stranieri, permetterà di avere all'interno degli edifici una adeguata ventilazione in ogni condizione, consentendo così di avere ambienti più salubri. Il tutto senza anche la necessità di dover spalancare gli infissi per ottenere il necessario ricambio d'aria, che risultano assai dispendiose da un punto di vista energetico. Facendo poi incrociare, nei mesi invernali, l'aria calda in uscita con quella fredda in entrata all'interno di appositi recuperatori di calore permetterà di ottenere un surplus di energia gratuita che ridurrà il salto termico richiesto ai generatori di calore;
- SISTEMA DI TELERISCALDAMENTO. L'intero complesso sarà servito da una unica centrale termica per tutti gli edifici, con il fabbisogno di energia ed i relativi costi di manutenzione che risulteranno conseguentemente fortemente ridotti rispetto a duecento piccole caldaiette. Per i singoli inquilini l'utilizzo di un sistema di contabilizzazione delle calorie permetterà di godere tutti i vantaggi di un termosingolo pur avendo un sistema centralizzato. Come terminali sono stati scelti dei fancoil che, oltre a funzionare a bassa temperatura, consentono un'agevole climatizzazione estiva. Per l'edificio «A Free» l'impianto di riscaldamento e climatizzazione è previsto con delle pompe di calore che, grazie a sonde geotermiche nel terreno sotto le fondazioni, otterranno tutto il calore necessario a riscaldare e raffreddare gli alloggi. L'energia necessaria per il loro funzionamento è garantita da pannelli solari fotovoltaici, ubicati sulla copertura.
- SISTEMA DOMOTICO. Ogni alloggio sarà dotato di impianto elettrico domotico che, oltre ad automatizzare molte operazioni all'interno degli alloggi, permetterà di tenere sotto controllo automaticamente tutte le utenze ed i consumi, attivandosi ogniqualvolta si verifichi una anomalia. Il proprietario potrà essere poi informato in tempo reale ed intervenire in modalità remota su tutti i comandi, riducendo così ogni possibile spreco.
- TETTO VENTILATO. La copertura è stata progettata in modo da tenere adeguatamente distanziato il manto di copertura dal tetto vero e proprio. In questo modo dentro il cavedio si formeranno, durante le ore più calde, dei moti convettivi che contribuiranno a dissipare parte del calore estivo causato dall'irraggiamento solare.



Figura 3 - Schema riassuntivo dell'applicazione dei diversi elementi di studio negli edifici proposti.

Grande attenzione è stata infine posta alla definizione architettonica dei singoli alloggi di tutto il complesso, al fine di evitare che, come avviene in molti casi del genere in nord - Europa, l'aspetto tecnologico – prestazionale abbia il sopravvento. Quello che si è voluto evitare è dunque che, al fine di ottenere grandi risultati energetici, si realizzino delle costruzioni che sacrifichino i vari ambienti a forme innaturali, con pesanti ripercussioni sul loro futuro utilizzo. Per questo un apposito gruppo di architetti specializzati nell'interior design ha lavorato sulla definizione dei singoli ambienti, in modo da ottenere abitazioni non solo efficienti, ma anche gradevoli e belle da abitare.

- Progetto architettonico: arch. Giampaolo Dellarosa – arch. Duccio Chimenti (Studio SINTER – Firenze)
- Progetto Impianti: P. I. Mirko Marchesini (Studio R.B. – Modena)
- Consulenza energetica ed impiantistica: arch. Fabio Sciurpi, arch. Cristina Carletti, arch. Charlotte Rummel (Università di Architettura di Firenze – Dipartimento di Tecnologia dell'Architettura 'Pierluigi Spadolini')
- Progetto architettura degli interni: Prof. Arch. Flaviano Maria LoRusso
- Progetto acustico: P. I. Claudio Martorana (Studio Becherini & Martorana - Vinci)
- Consulenza soluzioni di Bioarchitettura: arch. Leonardo Cerbai



Figura 4 - Prospettiva dell'edificio «A free».